

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Výpočet tavné charakteristiky pojistky**

*Fuse fusible characteristic curve calculation*

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Josef Gracias**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

**Výpočet tavné charakteristiky pojistky**  
**Fuse fusible characteristic curve calculation.**

Zásady pro vypracování:

1. Definujte princip činnosti pojistek, se zaměřením na tavnou charakteristiku.
2. Na vybraném typu pojistky realizujte numerický model pro simulaci tavné charakteristiky.
3. Řešením výše zmíněného modelu vypočtete tavnou charakteristiku pro zadané hodnoty nadproudu a zkratu.
4. Rozeberte výsledky z hlediska přesnosti a definujte podmínky aplikovatelnosti modelu pro reálné podmínky výroby.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry




  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlášení:

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

Datum odevzdání: 4.5.2012

  
Podpis: .....

Dovoluji si poděkovat Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc. za odbornou pomoc při zpravování diplomové práce.

Na tomto místě chci také zmínit a poděkovat Oddělení laboratorního výzkumu geomateriálů, Ústavu geoniky Akademie věd České republiky za poskytnutí prostor a technického vybavení. Především pak doc. Ing. Jiřímu Ščučkovi, Ph.D. a Anežce Duškové.

Rád bych také poděkoval svým rodičům za jejich podporu, kterou mi poskytovali po celou dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem tavné charakteristiky nožové pojistky pomocí metody konečných prvků (MKP). Je zde vysvětlen princip činnosti pojistek, popsán jejich význam v elektrickém obvodu, uvedeny jejich výhody a nevýhody, základní konstrukční provedení, vysvětleny jevy probíhající na tavném vodiči při vypínání zkratu a nadproudu. Výpočtu tavné charakteristiky předcházelo měření materiálových vlastností křemičitého písku a měření oteplení pojistky při průchodu jmenovitého proudu. Řešením numerického modelu pak byla vypočtena tavná charakteristika vybrané pojistky a zhodnoceny získané výsledky.

## **Klíčová slova**

pojistka, tavný vodič, zkrat, nadproud, tavná charakteristika, oteplení, selektivita, MKP – metoda konečných prvků, výpočtová síť, numerický model, přestup tepla

## **Abstract**

The aim of this thesis is calculation of prearcing characteristic of fuse-links with blade contacts by finite element method (FEM). Inside are explained: principle of fuses, describe influence in electrical circuit, advantages and disadvantages, basic design of fuses and describe steps inside fuses during short circuit and over current. Measurement of materials properties of silica sand and measurement of warming of fuse with main current were made before this calculation. Solution of numerical model was calculated prearcing characteristic selected fuse and evaluated results.

## **Key words**

fuse, melting wire, short circuit, overcurrent, prearcing characteristic, warming, selectivity, FEM – finite element method, computational network, numerical model, heat transfer

## Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>3</b>
<b>1 Elektrické pojistky .....</b>	<b>4</b>
1.1 Definice principu činnosti .....	4
1.2 Umístění pojistky v elektrickém obvodu .....	4
1.3 Výhody a nedostatky pojistek .....	5
1.4 Základní konstrukční pojetí.....	6
1.5 Základní parametry a jmenovité hodnoty pojistek.....	8
1.6 Jevy na tavném vodiči.....	9
1.7 Energie propuštěná pojistkou .....	10
1.8 Tavná charakteristika pojistek.....	12
1.9 Omezovací charakteristika pojistek .....	14
<b>2 Selektivita jištění .....</b>	<b>15</b>
2.1 Definice selektivity .....	15
2.2 Způsoby zajištění selektivity.....	15
<b>3 Metoda konečných prvků .....</b>	<b>17</b>
3.1 Historický vývoj metody konečných prvků .....	17
3.2 Využitelnost metody konečných prvků.....	17
3.3 Podstata metody konečných prvků.....	19
3.4 Výpočtová síť.....	20
3.4.1 Kritéria pro posouzení kvality sítě .....	21
3.5 Implementace metody konečných prvků v počítači .....	22
<b>4 Výběr pojistky pro realizaci numerického modelu .....</b>	<b>24</b>
4.1 Tavná charakteristika pojistkové vložky PN1 63 A gG .....	25
4.2 Informace od výrobce .....	25
<b>5 Měření na nožové pojistce PN1 63A gG .....</b>	<b>27</b>
5.1 Měření materiálových vlastností křemičitého písku .....	29
5.2 Měření oteplení pojistky .....	31

<b>6 Výpočet tavné charakteristiky pojistky.....</b>	<b>34</b>
6.1 Tvorba modelu pojistkové vložky .....	34
6.2 Řešení modelu v Ansys Workbench .....	35
6.2.1 Zadání materiálových vlastností.....	38
6.2.2 Zadávání proudu a napětí.....	38
6.2.3 Definování přestupu tepla do okolí .....	39
6.2.4 Výpočet .....	39
<b>7 Závěr .....</b>	<b>51</b>
<b>Použitá literatura: .....</b>	<b>53</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>55</b>

## Úvod

V této diplomové práci se zabývám problematikou výpočtu tavné charakteristiky pojistky za pomoci numerického modelu vytvořeného v programu Ansys Workbench, který pro řešení využívá metodu konečných prvků. Výše zmíněný model byl vytvořen pro nožovou pojistku řady PN1 s jmenovitým proudem  $I_N = 63 \text{ A}$ , výrobce OEZ s.r.o.

V první kapitole je popsán princip činnosti elektrických pojistek s příklady jejich nejčastějšího konstrukčního provedení a vysvětlením jejich výhod a nedostatků. V další části této kapitoly uvádím základní parametry, jmenovité hodnoty a detailněji popisují jevy na tavném vodiči při vypínání zkratu a nadproudu. Základním charakteristikám pojistek, tavné a omezovací, je věnován prostor na konci kapitoly.

S použitím pojistek v elektrickém obvodu úzce souvisí problematika selektivity jištění, které je věnována kapitola druhá. Jsou v ní uvedeny základní způsoby na zajištění selektivity.

Kapitola třetí se věnuje metodě konečných prvků, jejímu historickému vývoji, využitelnosti této metody v praxi a je zde též vysvětlena její podstata. V závěru kapitoly jsou pak uvedeny nároky, které se kladou na výpočtovou síť a popsány základní kritéria na posouzení její kvality.

Výběrem pojistky pro výpočet tavné charakteristiky se zabývá kapitola čtvrtá, ve které jsou rovněž uvedeny základní jmenovité hodnoty a charakteristiky uváděné výrobcem zvolené pojistky.

Pátá kapitola prezentuje měření, která byla provedena na zmíněné pojistce, či jejích částech (křemičitý písek) pro potřeby tvorby numerického modelu.

Závěrečná část práce pak popisuje tvorbu samotného numerického modelu pro výpočet tavné charakteristiky pojistky (kapitola šestá), jsou zde prezentovány dosažené výsledky a uvedeno závěrečné zhodnocení práce (kapitola sedmá).



# 1 Elektrické pojistky

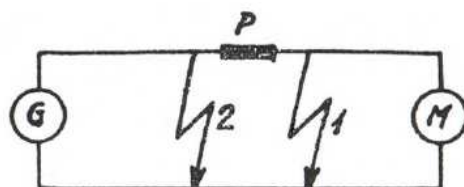
## 1.1 Definice principu činnosti

„Pojistka je jednoduchý přístroj určený k jištění elektrických obvodů proti účinkům nepřipustně zvýšeného proudu. *Její funkce je založena na principu tepelně nejslabšího místa proudovodné dráhy.* Ve vhodném místě proudovodné dráhy, nebo na několika vhodně zvolených místech mezi zdrojem a spotřebičem, je úmyslně zeslaben průřez proudovodné dráhy, menší než v celém zbývajícím obvodu. Průchodem proudu se vodiče účinkem Jouleových ztrát (tepla) zahřívají. Dojde-li k nežádoucímu zvýšení proudu nad přípustnou mez, odpovídající bezpečnému provozu, zahřívá se nejvíce právě vodič se zeslabeným průřezem a dojde k přetavení tohoto vodiče a přerušení elektrického obvodu dříve, než zvyšující se teplota, případně mechanické síly vyvolané zvýšeným proudem, ohrozí nebo poškodí další části obvodu. Tento zeslabený průřez umístíme do samostatného přístroje – elektrické tavné pojistky. Zapůsobením pojistky dojde k nevratnému poškození tavného vodiče a pojistka musí být vyměněna.

Principu nejslabšího místa se s úspěchem používá i v jiných elektrotechnických aplikacích a také i v neelektrotechnických oborech. Např. elektrická bleskojistka je přístroj na jištění elektrického zařízení proti přepětí. Je v ní vytvořeno nejslabší místo z hlediska elektrické pevnosti izolace a bleskojistka tedy jistí izolaci soustavy (bleskojistka však svoji elektrickou pevnost obnoví samočinně, jakmile elektrický náboj vytvářející přepětí odvede k zemi). U vypínače s malým množstvím oleje se někdy používá pojistných membrán, tj. místa mechanicky nejslabšího a jistícího zhášedlo proti nadměrným tlakům. Při neobvyklém zvýšení tlaku praskne membrána, tlak se uvolní a tím se zachrání mnohem dražší zhášedlo před zničením.

## 1.2 Umístění pojistky v elektrickém obvodu

Z hlediska působení pojistky v elektrickém obvodu musíme rozeznávat přetížení a zkrat. Nastane-li situace, při které dojde např. k přetížení motoru, tím k průchodu nadproudu vinutím tohoto motoru a zapůsobí pojistka tomuto motoru předřazená (obr. 1), pak tato pojistka chrání tento motor proti nepříznivým účinkům nadproudu.

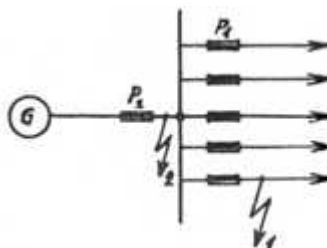


obr. 1 Princip ochrany pojistkou

Nastane-li zkrat na svorkách téhož motoru (obr. 1, označeno 1), pak tatáž pojistka nechrání tento motor proti účinkům zkratového proudu (proud motorem neprotékal), pojistka v tomto případě jistí pouze část obvodu před sebou (od generátoru G až k pojistce)

Nastane-li zkrat před pojistkou (obr. 1, označeno 2), pojistka přirozeně nemůže působit a zkrat je nutno vypnout jiným přístrojem nebo i pojistkou zapojenou do obvodu blíže ke generátoru.

V případě rozvětvených obvodů (obr. 2) budou pojistky umístěné v jednotlivých větvích ( $P_1$ ) dimenzovány podle jmenovitých proudů těchto větví, kdežto pojistka, těmto pojistkám ve směru ke zdroji předřazená ( $P_2$ ), bude dimenzovaná na součet proudů všech větví.



obr. 2 Princip jištění rozvětvených vedení

### 1.3 Výhody a nedostatky pojistek

Jako jisticí přístroj je pojistka při vypínání zkratu v několika ohledech dokonalejší a výhodnější než jistič nebo vypínač. Moderní pojistky se při vypínání zkratů vyznačují těmito vlastnostmi:

- Působení pojistky je velmi rychlé. Působí tím rychleji, čím větší je zkratový proud. Toto je velmi výhodné z hlediska jištěného obvodu, neboť zkratový proud protéká obvodem po dobu co nejkratší.
- V důsledku velké rychlosti působení pojistka značně omezuje zkratový proud. Nepřipustí, aby proud dosáhl své vrcholové hodnoty a přeruší ho dříve. To je ve srovnání s vypínači a neomezujícími jističi (kdy je proud vypnut v lepším případě až po průchodu proudů první nulou, tj. po průchodu proudů maximem) vlastnost velmi cenná, protože celý obvod je při zkratu tepelně i mechanicky značně méně namáhán, je ho možné méně dimenzovat a dosáhnout úspor na materiálu, investicích a prostoru.
- Pojistka je podstatně menší a levnější než jistič či vypínač a na údržbu je velmi nenáročná.

Na druhou stranu užití samotné pojistky pro jištění obvodů není výhodné z důvodů některých jejích nedostatků:

- Po každém zapůsobení pojistky je trvale přerušena proudovodná dráha, pojistku je třeba vyměnit, což v rozvodech, ve kterých se vyskytují nebo je zvýšená pravděpodobnost výskytů přetížení a zkratů, je ekonomicky a provozně nevýhodné.
- V oblasti malých přetížení je použití pojistky sporné, ne-li vyloučené. Pojistka musí trvale snášet jmenovitý proud. Jelikož je však její působení založeno na tepelném účinku

proudu, musí hodnota proudu při kterém se pojistka právě přetaví ležet nad hodnotou proudu jmenovitého. Odstup mezi těmito dvěma proudy musí být dostatečný, aby pojistka při jmenovitém proudu nepracovala v oblasti blízké teplotě tavení vodiče. Tento požadavek však nevyhovuje požadavku jistění malých nadproudů.

Obvykle proud, při kterém se pojistka právě přetaví, a který nazýváme *krajním proudem*, leží u pojistek pro všeobecné použití v rozmezí  $1,3 - 1,6 I_N$ . Velké tolerance krajního proudu jsou dány výrobními nepřesnostmi (tolerancemi tavných vodičů). Tyto tolerance se projevují i rozptylem tavné doby vodičů.

Vzhledem k uvedeným přednostem a nedostatkům jsou v mnoha případech velmi výhodné kombinace pojistek s jinými přístroji. V oboru nízkého napětí jsou to zejména kombinace pojistek s jističi nebo stykači, v oboru vysokého napětí pak kombinace pojistky s odpínačem. Pojistka ve všech uvedených případech vypíná zkrat, stykač, jistič nebo odpínač jsou vybaveny nadproudovým relé nebo spouští a vypínají přetížení.“[1, 2]

## 1.4 Základní konstrukční pojetí

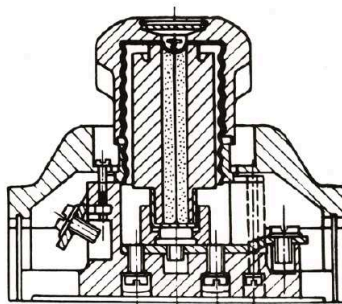
„Je známo, že již T.A. Edison (1847-1931) používal pojistky. Jako pojistek používal pásků tenké cínové folie. Na počátcích elektrotechniky se jako pojistek používalo tenkých měděných drátků, napnutých mezi dvěma šrouby. V dokonalejším provedení byla k drátku připájena očka k přichycení pod šroubové svorky. V pozdější fázi byl drátek nebo pásek vložen do porcelánové nebo skleněné trubky opatřené na koncích objímkami, případně trubky s izolačními žebry. Toto provedení, pod názvem trubkové pojistky, se používalo i v oblastech středně vysokých napětí.

V oblasti vysokých napětí se později vyvinuly a dosti rozšířily pojistky plynotvorné, nazývané také vyfukovací. U těchto pojistek byl tavný vodič uložen, nebo elektrický oblouk vtažen do trubky z plynotvorného materiálu. Vysokou teplotou oblouku se ze stěn uvolnilo značné množství plynů, které vytvořily přetlak v trubce. Plyn rychle vyfoukl z trubky a intenzivně ochladil a uhasil oblouk. Tato konstrukce byla do značné dokonalosti dovedena zejména v USA. Je však zřejmé, že kolem pojistky muselo zůstat dostatek místa pro výfuk žhavých plynů.

V Německu vznikly kolem roku 1940 pojistky na vysoké napětí plněné tekutým hasivem, obvykle tetrachlorethylénem. V těchto pojistkách bylo konstrukčně zajištěno proudění izolační náplně kolem hořícího oblouku. Takto se hořící oblouk účinně chladil a nakonec došlo k jeho uhašení. Výhodou těchto pojistek proti předchozím je, že mají uzavřenou zhášecí vložku, takže z nich nic neuniká ani nevyfukuje. Vypínací výkon těchto pojistek však nebyl příliš vysoký.

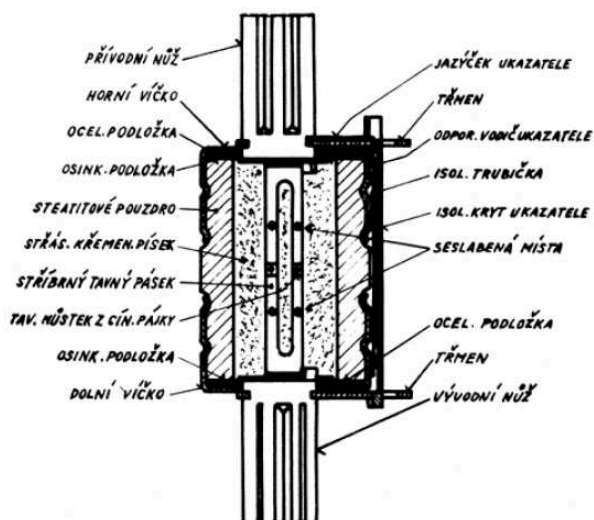
V poslední době se dospělo ke konstrukcím, které jsou svým celkovým pojetím značně ustálené na celém světě, i když se samozřejmě výrobky jednotlivých výrobců v detailech liší. Ve srovnání s doposud uvedenými konstrukcemi mají několik technických předností a společných rysů.

Vyvinuly se v podstatě tři základní konstrukční formy, odlišné výkonem a napětím. Pro domovní instalace a lehčí průmyslové instalace se používá závitových pojistek podle obr. 3.



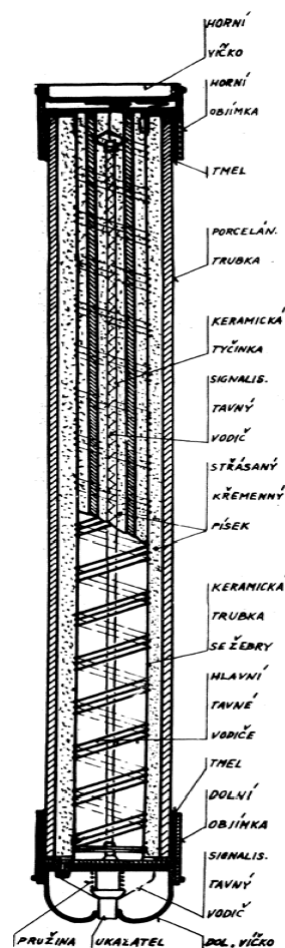
obr. 3 Řez úplnou pojistkou závitovou

Pro těžké průmyslové instalace na nízké napětí jsou obvyklé nožové pojistky (obr. 4), tyto jsou určeny pro proudy  $I_N$  až 1600A a vypínací schopnost mají až 120 kA (OEZ Letohrad). V oboru vysokých napětí se vyvinuly pojistky patronové (obr. 5).“[1]



obr. 4 Informativní řez nožovou pojistkou

Mimo tyto tři základní konstrukční formy pojistek se dnes vyrábí mnohé další. Uvedu např. skleněné trubičkové pojistky na ochranu drobné spotřební elektroniky, pojistky pro jištění polovodičů, autopojistky, trakční pojistky (odolné proti ořesům a vibracím) určené pro montáž do lokomotiv.



obr. 5 Konstrukce patronové pojistky

## 1.5 Základní parametry a jmenovité hodnoty pojistek

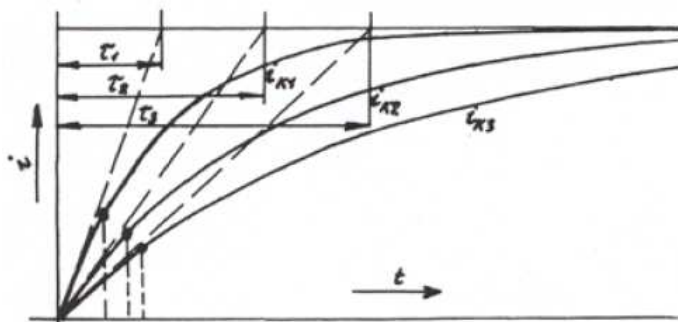
„*Jmenovité napětí*  $U_N$  je napětí, na které je pojistka navržena, postavena a je uvedeno na pojistkové patroně. Pojistkové vložky musí být navrženy a zhotoveny na to jmenovité napětí, při kterém budou působit, jinak by mohly být zdrojem nepřipustných přepětí. Obloukové napětí je totiž navrhováno jako určitý násobek jmenovitého napětí.

*Jmenovitý proud*  $I_N$  je proud, který musí pojistka trvale snést, aniž by teplota jednotlivých částí a hlavně tavného elementu překročila přípustné meze a pojistka by zapůsobila.

*Krajní proud*  $I_{KR}$  je ten největší proud, při jehož trvalém průtoku pojistkou se tavná vložka právě ještě nepřetaví. Jeho poměr k jmenovitému proudu je dán normou.

*Vypínací schopnost* pojistky není definována velikostí proudu, který při jejím zapůsobení vznikne, ale *proudem*, který by v obvodě vznikl, kdyby pojistka byla nahrazena vodičem o zanedbatelné impedanci. Protože tento proud, který, jak předvídáme, by obvodem tekla, nebýt omezovacího účinku pojistky, nazýváme ho ve vztahu k pojistce *předvídaným proudem*. Uvádí se efektivní hodnotou ustálené složky zkratového proudu.

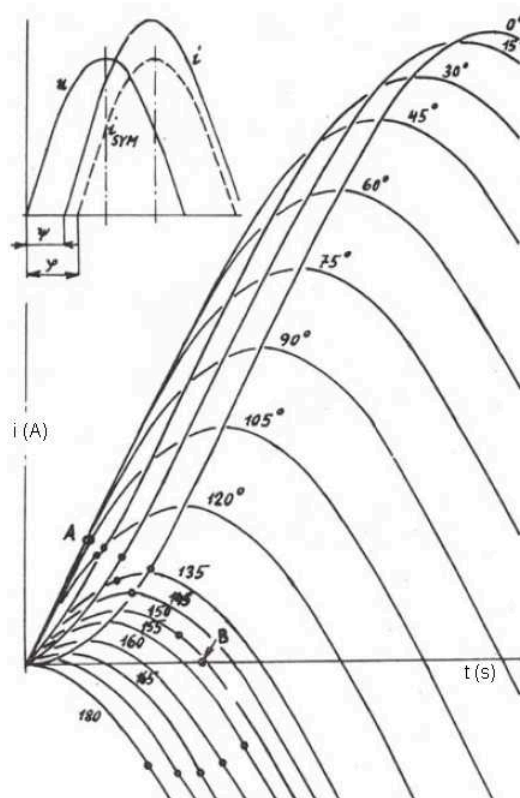
*Tavný proud* se obvykle ztotožňuje s vrcholovou hodnotou *omezeného proudu*. Jeho velikost je proměnná podle parametrů obvodu, resp. v závislosti na tvaru proudu na počátku zkratu, tj. na strmosti nárůstu zkratového proudu a na rychlosti pojistky (obr. 6).“[1]



obr. 6 Závislost doby vypnutí a tavného proudu na strmosti nárůstu zkratového proudu

„U střídavého proudu je situace poněkud složitější, neboť zde záleží na okamžiku vzniku zkratu vzhledem k sinusovému průběhu napětí, jak je naznačeno na obr. 7. Zde je  $\varphi$  fázový posuv mezi proudem a napětím a  $\psi$  je posunutí vzniku zkratu za předchozí nulou napětí. Tavný proud je největší pro úhel  $\psi$  asi 60 až 90 stupňů elektrických.

Celková *doba působení* je součtem tavné (předobloukové) doby a doby hoření oblouku. Doba působení nemá sama o sobě pro působení pojistky velkou důležitost. Podle obr. 7 bude nejdelší pro úhel vzniku zkratu  $\psi$  asi 150 až 160 stupňů el.“[2]

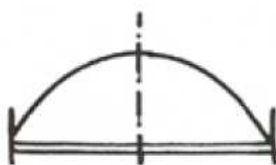


obr. 7 Závislost doby tavení a velikosti tavného proudu na úhlu vzniku zkratu

## 1.6 Jevy na tavném vodiči

„Tavný vodič je zpravidla umístěn v porcelánové tavné vložce. Okolní prostor tavného vodiče je vyplněn sypkým plaveným křemičitým pískem (někdy se užívá též mramorová moučka, mletý korund, mletá křemelina) předepsané zrnitosti. Prochází-li pojistkou proud, teplota pomalu vzrůstá, podélným odváděním tepla do velkých chladících ploch tvořených čely pojistky, noži či praporci, se teplota rozloží podél tavného vodiče podle obr. 8.

Tavné teploty nebude dosaženo na celé délce vodiče, ale v místě s nejmenším odvodem tepla do okolí tj. ve středu tavného vodiče. Přetavením vodiče se vytvoří meze, v níž se, má-li zdroj dostatečné napětí, zapálí oblouk. Elektrický oblouk má větší elektrický odpor než tavný vodič a množství tepla vzniklého průchodem proudu ( $i$  při stálé hodnotě proudu) je podstatně větší než teplo vznikající v tavném vodiči a dochází k odtavování zbylých částí tavného vodiče až do okamžiku, kdy oblouk dosáhne délky postačující k jeho uhasnutí.



obr. 8 Rozložení teploty na tavném vodiči při vypínání nadproudu

Začne-li pojistkou procházet proud zkratový, který má velkou strmou nárůstu, nedochází (jen zanedbatelně) k odvodu tepla do okolí, teplota roste po celé délce tavného vodiče současně a tudíž dosáhne i tavné teploty současně. Vodič přejde během velmi krátké doby ze stavu pevného, přes kapalný (tento stav nazýváme unduloidem) do stavu plynného. Popsaný děj je naznačen na obr. 9.

Vypařený a ionizovaný kov je vržen na stěny kanálu tvořeného křemičitým pískem (či jiným hasivem), mezi čely pojistkové patrony hoří oblouk, písek se zahřívá a taví, čímž vznikají tepelné ztráty. Oblouk je intenzivně chlazen a vzniká velký obloukový gradient. Vzhledem k tomu, že oblouk hoří v úzkém prostoru vymezeném průměrem kanálu tvořeného spečeným pískem, má velkou proudovou hustotu a úbytek napětí na oblouku vzroste nad napětí zdroje, načež oblouk uhasíná.“[1, 2]



obr. 9 Fáze tavného vodiče při zkratu

## 1.7 Energie propuštěná pojistkou

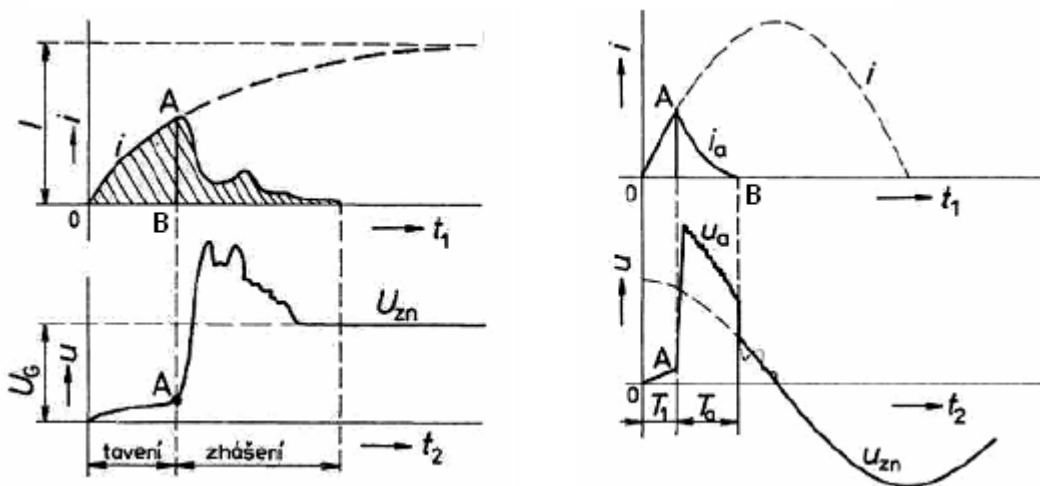
„Za předpokladu, že celá energie vytvořená obloukem zvětší kinetickou energii molekul plynu, platí pro vztah mezi tlakem  $p$ , objemem  $V$ , energií  $W$ , následující rovnice.

$$p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot W \quad (1)$$

V zájmu jištění zařízení je však důležité, aby pojistka nedovolila dosažení plné velikosti zkratového proudu. Z toho důvodu požadujeme, aby se tavný vodič přetavil při podstatně menším proudu, ještě v počáteční fázi vývoje zkratového proudu, neboli, aby pojistka zkratový proud omezila.

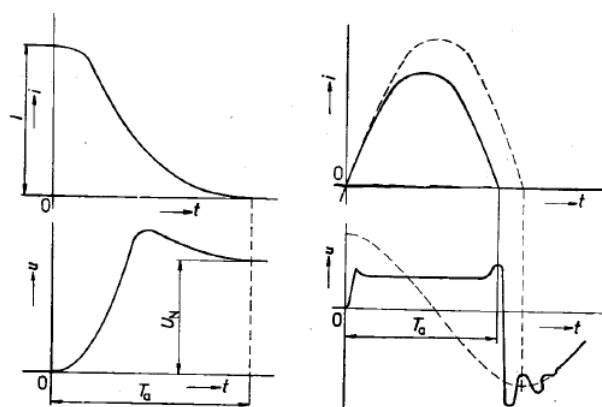
Vypnutí pojistky při zkratu ve stejnosměrném obvodu je charakterizováno průběhy proudu a napětí podle obr. 10 (levá část). Šrafovaná plocha je úměrná energii propuštěné pojistkou do jištěného zařízení. Ta musí být menší než tepelná odolnost tohoto zařízení. Část energie představující plochu ohraničenou body „0, A, B“ musí způsobit přetavení vodiče. Zbylá část šrafované plochy představuje energii propuštěnou za dobu hoření oblouku.“[3]

Při zkratu ve střídavém obvodu jsou průběhy napětí a proudu zachyceny na obr. 10 (pravá část). Plocha ohraničená body „0, A, B“ odpovídá propuštěné energii do chráněného zařízení. Zkrat vznikl v okamžiku „0“, proud dále vzrůstá podle sinusovky až k bodu „A“, který vyznačuje roztavení vodiče. Od bodu „A“ k bodu „B“ probíhá hašení oblouku a následné přerušení obvodu.



obr. 10 Průběhy proudu a napětí při přerušování stejnosměrného a střídavého zkratu pojistkou

„Při vypínání malého nadproudu, tj. při dlouhé době tavení vodiče, je průběh vypínání stejnosměrného a střídavého obvodu naznačen na obr. 11. Protože se odpor oblouku zvětšuje pozvolněji, za spolupůsobení zbytkové vodivosti výbojového kanálu po zhasnutí oblouku, nedochází k velkým přepětím. Charakter zotaveného napětí lze také ovlivnit konstrukční úpravou pojistky. Velký odpor oblouku způsobuje při malých nadproudech deformaci proudu a zkrácení doby půlvlny.“[4]



obr. 11 Vypínání malého nadproudu pojistkou

„Z uvedeného je patrné, že jde tedy o přiřazení průřezu vodiče k energii představující plochu ohraničenou body „0, A, B“ na obr 10. Protože doba tavení je velmi krátká, lze zanedbat odvádění tepla z tavného vodiče. Výchozím vztahem je rovnice energetické rovnováhy vyjadřující akumulaci tepla v tavném vodiči ve tvaru

$$\int_0^{T_{tav}} R \cdot i^2 dt = W_1 + W_2 \quad (2)$$



kde  $R$  odpor tavného vodiče  
 $W_1$  energie potřebná k ohřevu vodiče na teplotu tavení  
 $W_2$  energie potřebná k roztavení vodiče, tj. energie potřebná pro přechod ze skupenství pevného do skupenství kapalného.

Po úpravě dostaneme tvar

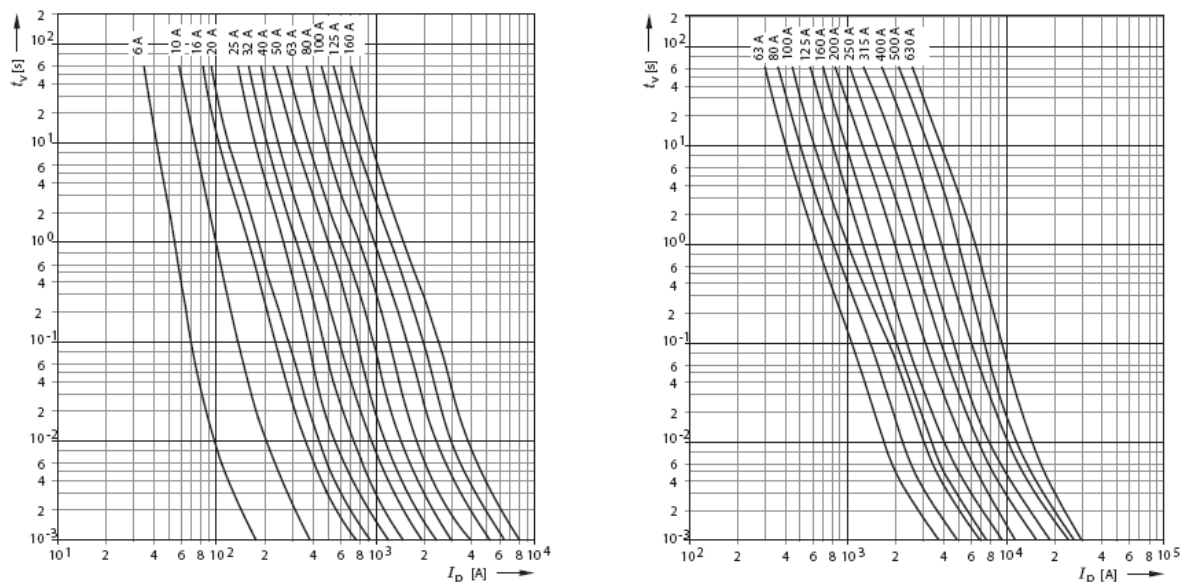
$$\int_0^{T_{tav}} i^2 dt = K \cdot S^2 \quad (3)$$

kde  $S$  průřez tavného vodiče  
 $K$  materiálová konstanta zahrnující (teplotní součinitel odporu, měrnou tepelnou kapacitu, konduktivitu, teplotu tavení materiálu, skupenské teplo tavení)

Odhadneme-li tedy velikost energie odpovídající uvedené plošce jako určitou část energie vyjadřující teplotní odolnost jištěného zařízení, lze z rovnice (3) pro zvolený materiál určit průřez tavného vodiče.“[3]

## 1.8 Tavná charakteristika pojistek

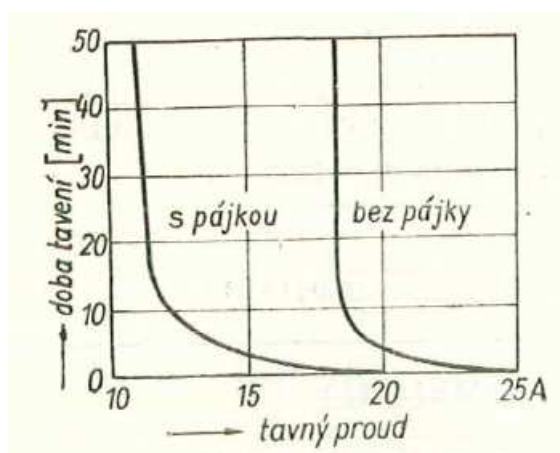
„Tavná charakteristika udává závislost tavné doby na velikosti proudu. Předpokládá se, že tavný proud má po dobu tavení stálou hodnotu. Tavná doba se liší také podle toho, zda pojistka byla před působením studená, nebo teplá v důsledku průchodu jmenovitého proudu.



obr. 12 Příklad tavných charakteristik pojistek

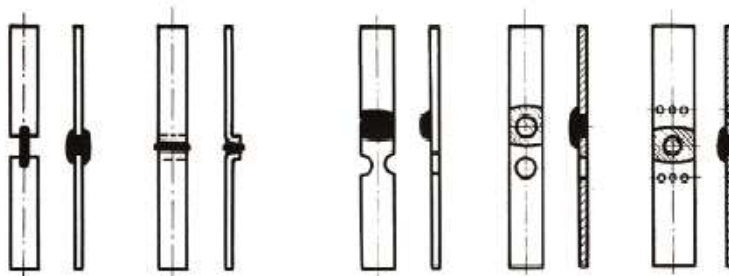
Tvar charakteristiky pojistky lze měnit konstrukčními zásahy na tavném vodiči. Dnes se tavné vodiče vyrábějí převážně ze stříbra a mědi, to jest z materiálů s výbornou elektrickou vodivostí. U pojistek s tuhým hasivem je dávana přednost stříbru, protože má menší výparné teplo a lepší elektrickou vodivost. Aby teploty tání, které se u obou těchto kovů pohybují okolo 1000 °C, (měď 1083 °C, stříbro 961 °C) nevedly při malých nadproudech k vyhřívání pojistkových spodků, upravují se tavné vodiče tak, že určité malé množství kovu s nízkou teplotou tání (např. cínové pájky) se nanese na tavný vodič v jeho střední části.

Nadproudem roztavený kov s nižší teplotou tání nesteče, adhezí a okolním pískem je držen na svém místě. Tento roztavený kov rozpouští základní materiál (stříbro, měď) a postupně s ním vytváří slitinu s teplotou tání okolo 360 – 400 °C. Toto opatření působí v oblasti malých nadproudů, tj. při několikaminutové době tavení. Při vyšších nadproudech, tedy kratších časech působení, se však tento děj neuplatní.



obr. 13 Vliv pájky na dobu tavení vodiče

Dalším opatřením pro úpravu tavného vodiče je zeslabení jeho průřezu v přesně definovaném místě, či děrování tavného vodiče. Tímto se docílí bezpečnější funkce při velkých nadproudech, snížení teploty pojistky a snížení špičky obloukového napětí.“[2]



obr. 14 Různé úpravy tavných vodičů výkonových pojistek

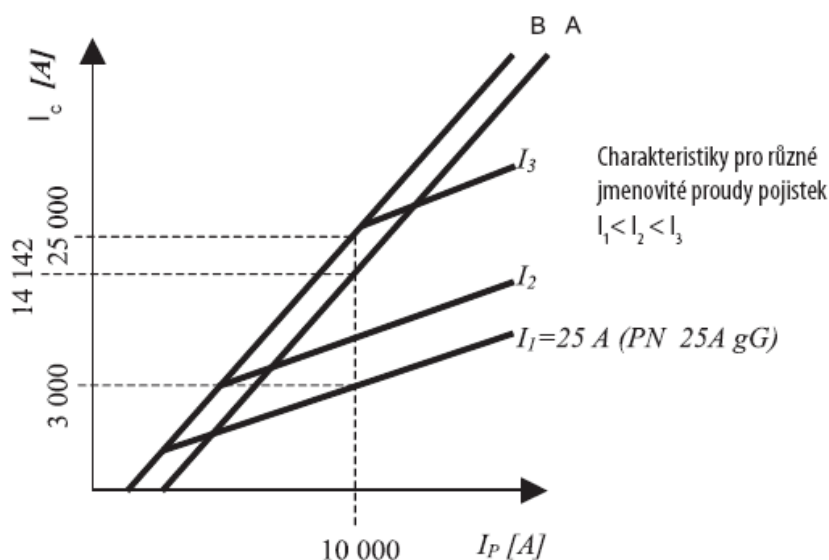
## 1.9 Omezovací charakteristika pojistek

„Omezovací charakteristika pojistky uvádí vztah mezi předpokládaným zkratovým proudem  $I_p$ , vynášeným na osu „x“ (v logaritmických souřadnicích), a proudem omezeným danou pojistkou  $I_c$ , vynášeným na osu „y“ (taktěž v logaritmických souřadnicích).

Příklad omezovací charakteristiky je uveden na obr. 15. Zde přímka „A“ uvádí, kdy pojistka přestává omezovat čistě symetrický zkratový proud. Pro efektivní hodnotu předpokládaného zkratového proudu  $I_p$  rovnu 10 000 A, uvádí tedy hodnotu  $\sqrt{2} \cdot 10\,000$  A (14 142 A).

Přímka „B“ uvádí, kdy pojistka obecně přestává omezovat maximálně nesymetrický zkrat, tj. takový zkrat, kdy se vyvine plně nesymetrická první půlvlna, jejíž maximální hodnota může v závislosti na  $\cos\varphi$  obvodu dosáhnout až 1,8 násobek maximální špičky symetrického sinusového proudu, tedy asi 2,5 násobek efektivní hodnoty předpokládaného zkratového proudu.

Pokud by tedy kolmice vztyčená z předpokládaného zkratového proudu na ose „x“ neprotřála omezovací charakteristiku pojistky dříve, než-li přímku „A“, resp. „B“ (viz charakteristika pro jmenovitý proud pojistky  $I_3$ ), pak pojistka nebude omezovat. A naopak, pojistka jejíž omezovací charakteristika tato kolmice protne dříve, než-li přímku „A“, resp. „B“, bude nějakým způsobem omezovat (viz pojistky s jmenovitým proudem  $I_1$ ,  $I_2$ ).“[5]



obr. 15 Vysvětlení omezovací charakteristiky pojistky

## 2 Selektivita jištění

„Selektivita je základní podmínkou, která musí být vzata v úvahu již na počátku každého projektu elektrických rozvodů. K jištění elektrického zařízení se nepoužívá jen samotných pojistek, ale pojistky pracují současně s jističi, chrániči, tepelnými relé, atd. Jmenovitý proud pojistek se musí volit a spouště jističů nastavit tak, aby při svém působení odpojily jen část zařízení s poruchou a aby při normálním provozním stavu nenastalo jejich samovolné nežádoucí působení.

### 2.1 Definice selektivity

*Selektivita je taková koordinace pracovních charakteristik elektrických přístrojů (pojistek, jističů, tepelných relé, chráničů,...) zapojených v sérii, při které v případě vzniku poruchy, vypne pouze přístroj umístěný nejbližší nad místem poruchy, avšak další přístroje nepůsobí a zůstávají nadále v provozu.*

Selektivita

- Schopnost, citlivost výběru, ladění
- Výběrovost, schopnost a dovednost vybrat si (detekovat) ze shluků jevů nebo aktivit jev nebo činnost, mající v dané situaci prioritní význam

Je-li např. vedení na začátku jištěno pojistkou a spotřebič na konci jističem, pak při přetížení způsobeném spotřebičem má vypnout nejprve jistič. Selektivitu dvou jisticích přístrojů zjišťujeme z jejich vypínacích charakteristik. Použijí-li se k jištění pouze pojistky, lze selektivitu zajistit jen pojistkami s rozdílným průběhem vypínací charakteristiky.

Vypínací charakteristika pojistky však není jen určitá křivka. Zejména vlivem výrobních tolerancí a technologií výroby se stává, že pojistky se stejnými hodnotami nemají totožné vypínací charakteristiky. Proto výrobci jisticích zařízení udávají celá pásma. U pojistek se stejným jmenovitým proudem, se však následkem překrývání jejich pásem může stát, že pomalá pojistka bude působit rychleji než pojistka rychlá, takže selektivita by v tomto případě nebyla zajištěna. Spolehlivě dosáhneme žádaného časového odstupňování volbou pojistek s rozdílným jmenovitým proudem. V jisticích systémech je vhodné použít pojistek zejména pro jištění proti zkratům. Naopak nevhodné jsou pojistky pro jištění malých nadproudů.

### 2.2 Způsoby zajištění selektivity

- Proudová selektivita  
Tato metoda je založena na rozdílu nastavených, nezpožděných hodnot spouští. Typickým příkladem je např. použití dvou pojistek se stejným typem charakteristiky, ale jinou jmenovitou hodnotou.

- Časová selektivita  
Dosahuje se časovým zpožděním  $\Delta t$  selektivní zkratové spouště. Vychází z pravidla, kdy se nesmí křížit, popřípadě překrývat charakteristiky jističů pro jakoukoli hodnotu předpokládaného zkratového proudu
- Energetická selektivita  
Tento typ selektivního působení je založen na přesném zvládnutí energie prošlé jistícím prvkem během vypínání.
- Kombinovaná selektivita  
Jednotlivé metody řešení selektivity jsou obvykle kombinovány pro zajištění co největší spolehlivosti napájení. Při návrhu řešení selektivity se nejčastěji využívají tabulky výrobců jistících prvků, kde jsou také uvedeny meze selektivity.

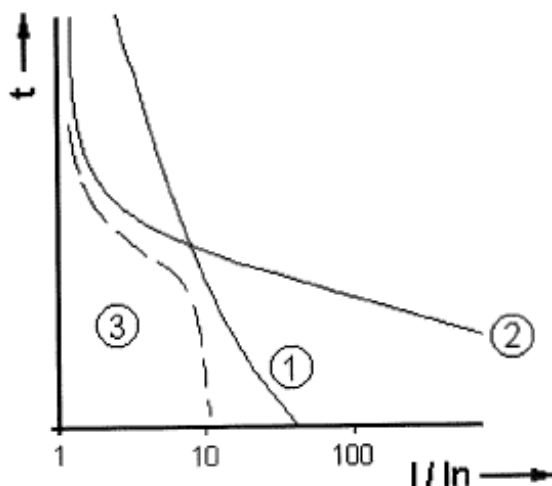
#### *Úplná selektivita*

Je zajištěna tehdy, když v důsledku poruchy vypne pouze nejbližší ochranný prvek z pohledu zátěže – tzv. přiřazený, a to pro všechny hodnoty poruchových proudů.

#### *Částečná selektivita*

O částečnou selektivitu jde tehdy, když není splněna podmínka všech hodnot poruchových proudů, tzn. platí do určité hodnoty.

Na obr. 16 je zobrazeno porovnání vypínacích charakteristik pro jištění elektromotoru. Tepelné vlastnosti elektromotoru při přetěžování z hlediska dovoleného oteplení představuje křivka (3). Křivka (1) znázorňuje vypínací charakteristiku pojistky, která jištěnému elektromotoru nevyhovuje při nadproudech. Naopak vypínací charakteristika tepelné spouště jističe (2) nevyhovuje v oblasti zkratů. Ovšem jejich kombinací je zajištěno spolehlivé jištění tohoto elektromotoru.“[6]



obr. 16 Porovnání vypínacích charakteristik

### 3 Metoda konečných prvků

#### 3.1 Historický vývoj metody konečných prvků

„Maticové metody strukturální analýzy se staly nezbytné na konci čtyřicátých a počátku padesátých let dvacátého století při řešení strukturních konstrukcí zvláště v letectví. Hlavní problém však byl nedostatek, téměř úplná absence, výpočetní techniky, tedy počítače s vlastní pamětí. První počítač ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) byl vyvinut v roce 1946. Tento počítač měl 19000 elektronek, avšak malou paměť. Podle literárních údajů z této doby vážil 30 tun, zaujímal asi 110m<sup>3</sup> prostoru a jeho příkon byl 140kW. Pro chlazení spotřeboval denně několik tun ledu.

Základní idea metody konečných prvků vznikla při řešení rozsáhlých rámových konstrukcí. V roce 1941 Hrenikoff provedl pomocí tzv. „*Frame work method*“ řešení problému elasticity. Obvykle je však vznik metody konečných prvků (MKP, angl. FEM – *Finite Element Method*) připisován matematikovi Courantovi, který v roce 1943 publikoval práci zabývající se problémem torze a v ní nastínil matematický postup, který se stal základem metody konečných prvků. Rozdíl mezi jeho koncepcí a koncepcí metody konečných prvků byl v tom, že Courant užíval konečné diference. O další rozvoj této myšlenky a uplatnění v technické praxi se zasloužili hlavně inženýři, kteří ji aplikovali při řešení statických a dynamických úloh. V roce 1956 Turner a kol. provedl analýzu rovinné úlohy pomocí rozkladu na prvky trojúhelníkového tvaru s třemi uzly. V šedesátých letech s rozvojem počítačových technologií pak byly provedeny analýzy značného množství prvků.

Inženýrské pojetí metody konečných prvků bylo později prohloubeno především po matematické stránce. V roce 1956 Melosh prokazuje, že metoda konečných prvků je moderní variantou Ritzovy metody a lze jí řešit i jiné fyzikální problémy. Velkým přínosem v oblasti aplikace pak byly práce Zinkiewiczze, Cheunga a později pak Fellipa, Ironse a Marcala.“ [7]

#### 3.2 Využitelnost metody konečných prvků

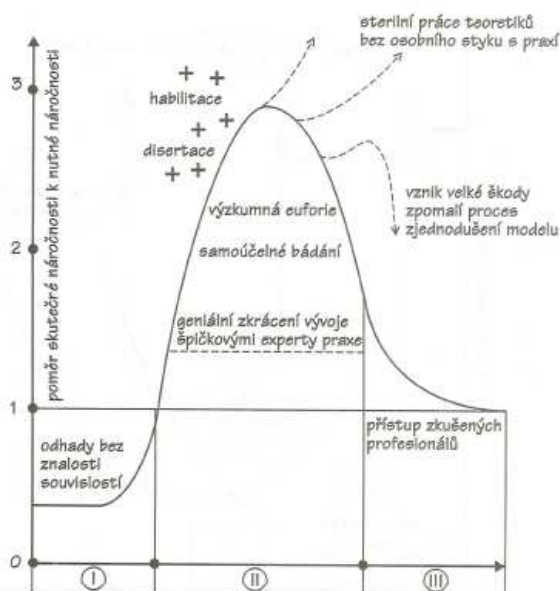
„Literatura zabývající se teorií a aplikací metody konečných prvků je velmi rozsáhlá a použití velmi široké. Časté je její použití při řešení problémů mechaniky deformovatelných těles. V současné době se řeší úlohy statiky a dynamiky konstrukcí s aplikací téměř ve všech odvětvích průmyslu, jako např. ve strojírenství, stavebnictví, v leteckém a lodním průmyslu, v energetice, elektrotechnice. Kromě toho jsou řešeny pomocí metody konečných prvků problémy proudění, magnetických polí, ale také úlohy biomechaniky, jako např. proudění krve v komorách srdce, pevnostní problémy lidské kosti, či dentálních náhrad. Vše bylo možno provádět až po roce 1970, který je brán jako přelomový rok, a to proto, že v tomto roce vyvinula firma Intel první mikroprocesor.

Metoda konečných prvků se v současné době v procesu projektování stává velmi významným prostředkem pro numerickou analýzu mechanických vlastností konstrukce. Stala se řádovou službou s programovým prostředím, které je velice výkonné a pro vyškolenou obsluhu i bezpečné.

Klíčovým krokem metody konečných prvků je sestavení soustavy lineárních algebraických rovnic, které je řízeno strukturou (modelem), která je vytvořena z tělesa jeho rozkladem na prvky vyplňující celý jeho objem. Postup výpočtu mechanických charakteristik má u všech prvků stejný jednoduchý předpis. Úlohou uživatele je v zásadě jen vytvoření sítě prvků a i tento krok zvládne počítač z velké části automaticky. Z matematického hlediska je tvorba sítě rovnocenná návrhu bazových funkcí klasických variačních metod, které je však u těchto metod třeba konstruovat pro každou úlohu individuálně.

Moderní programy aplikující MKP v mechanice jsou budovány jako expertní systémy, které si samy vytvářejí modely, vybírají vhodné schéma výpočtu a podrobují své výsledky analýze přesnosti. Je však třeba myslet na to, že programy s prvky inteligence a optimalizace jsou i při maximálním úsilí tvůrců náchylné k chybám (programátorský folklór praví, že každý program lze zkrátit na jediný příkaz, který je chybný). Jedinou možností jak nalézt výpočtovou chybu je kritický rozbor výsledků, což vyžaduje, aby uživatel znal fyzikální podstatu analyzovaných jevů a principy samotné metody.“[7]

„Reklama softwarových firem zabývajících se vývojem FEM, tuto metodu prezentuje jako všelék na veškeré problémy výpočtů konstrukcí i v nelineární oblasti (což skutečně je), ale bez odvrácené strany věci: potřeby pochopení fyzikální a technické problematiky na podstatně vyšší úrovni než představuje dřívější „podniková statika“. Naléhavost trvalého vzdělávání se v této oblasti přesouvá do problematiky výstižného modelování. Stupeň využití dnešních programů FEM závisí dnes prakticky hlavně na vyspělosti jejich uživatelů.



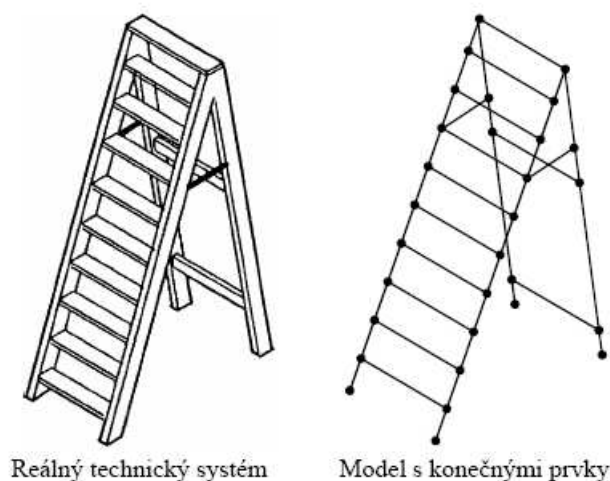
obr. 17 Typický vývoj výpočtových modelů

Na obrázku 17 je zachycen typický vývoj tvorby výpočtových modelů ve třech fázích. Primární fáze (I) je charakteristická velkou neznalostí skutečných dějů a odhady praktiků. Zkušenosti s náklady na odstraňování vad vedou postupně k druhé fázi (II), na které se kromě skutečných spotřebitelů – projektantů a na jejich potřeby orientovaných vědeckých či výzkumných pracovišť přizívá značná část teoretiků. Skutečný užitek přináší přechod k fázi poslední (III), v níž je náročnost modelu právě přiměřená nutnosti garantovat jak bezpečnost, tak hospodárnost díla. “[8]

### 3.3 Podstata metody konečných prvků

„Popis odezvy většiny reálných technických systémů na nějakou fyzikální akci uzavřenou soustavou matematických rovnic je velmi obtížný a často i prakticky nemožný. Metoda konečných prvků poskytuje vhodný způsob získání přibližného řešení takových problémů. Název *konečný prvek* charakterizuje základní koncept metody: transformace technického systému s nekonečným počtem neznámých (odezva libovolného bodu systému) na systém s konečným počtem neznámých, které jsou navzájem svázané prvky konečné velikosti.

- Transformace technického systému (s nekonečně mnoho neznámými) na omezený model
- Model je matematickou idealizací reálného systému
- Pro popis modelu se používají uzly (*nodes*), elementy (*elements*) a okrajové podmínky (*boundary conditions*)



obr. 18 Rozdíl mezi technickým systémem a aproximací konečnými prvky

Pod pojmem „*technický systém*“ si můžeme představit řadu problémů, např. konstrukčních, které je třeba vyřešit. Pro stavebního inženýra to může být most, budova, zatímco v elektrotechnice může být technickým systémem asynchronní motor.



Metoda konečných prvků je účinná metoda k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe, popsaných diferenciálními rovnicemi. Princip spočívá v rozdělení oblasti, zavedení uzlů a uzlových potenciálů. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat okraje hraničních ploch. V místě, kde se čeká prudká změna pole se zavede větší hustota sítě. Sestaví se soustava rovnic pro neznámé uzlové potenciály. Koeficienty matice soustavy se pak počítají jako integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejichž vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary pak nazýváme konečnými prvky.“[9]

Postup při aplikaci metody konečných prvků je tedy následující:

- Rozdělení struktury na malé kousky (prvky s uzly)
- Popis chování fyzikálních veličin v jednotlivých prvcích
- Propojení (sestavení) prvků v uzlech – vytvoření aproximačního systému rovnic pro celou strukturu
- Řešení systému rovnic s neznámými veličinami v uzlech (např. posunutí)
- Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty
- Výpočet požadovaných veličin (např. deformace, tlak) na zvolených prvcích

### 3.4 Výpočtová síť

„Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třídimeznionálním prostoru. Lze říci, že výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Neboť samostatný matematický model (systém matematických vztahů) je pouze „pasivním“ nástrojem, který nabývá smyslu až ve chvíli, kdy je aplikován na konkrétní problém (výpočtovou oblast pokrytou sítí).

V zájmu přesnosti matematické simulace je nutné provést odpovídající nastavení matematického modelu. Do různých modelovaných fyzikálních jevů mohou svým vlivem zasahovat mnohé jevy další. Toto všechno je třeba v nastavení zohlednit. Ovšem s každým dalším vlivem vstupujícím do výpočtu přibývají také další rovnice, které matematický model musí řešit. Proto se mohou i při stejně definované výpočtové oblasti i síti časy výpočtu u různých úloh značně lišit.

Počet buněk patří k hlavním limitujícím faktorům současného matematického modelování. U mnohých praktických úloh se počty buněk výpočtové oblasti pohybují v řádu milionů či mnohdy i desítek milionů. Nejsou to zanedbatelná čísla, neboť v každé z buněk je počítáno mnoho různých veličin. Proto je cílem každého řešitele s ohledem na budoucí čas výpočtu

redukovat počet buněk na nutné minimum. Z hlediska počtu buněk představuje obrovský nárůst například vytváření *mezních vrstev*.

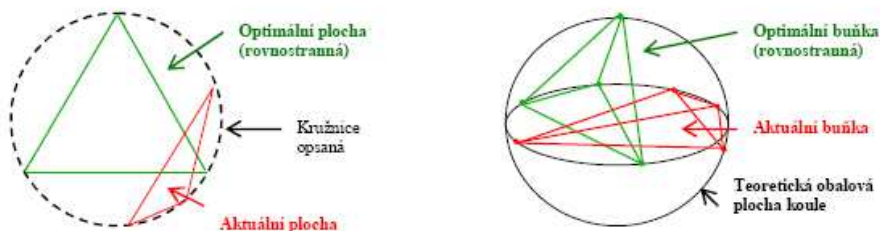
Minimalizování počtu buněk by však nemělo být prováděno na úkor kvality sítě. Kvalitní síť je taková, která se skládá z na sebe navazujících geometricky pravidelných přibližně stejně velikých a pravidelně po celé výpočtové oblasti rozložených elementů (buněk). Elementy by měly mít rovněž přiměřenou velikost, aby bylo možné jimi zachytit v dostatečné míře modelovaný fyzikální děj (např. jevy související s šířením tepla). Z hlediska reálného možného počtu buněk však v praxi dodržení všech ideálních předpokladů pro tvorbu sítě není většinou možné. Proto se používá zhušťování sítě v místech, která jsou z hlediska sdílení tepla pro řešitele zajímavá nebo pro výpočet stěžejní a naopak použití řidší sítě v místech jiných. Zvláštním případem zhuštění buněk je vytvoření tzv. „*mezní vrstvy*“ v blízkosti stěn, která má za úkol zachytit velké změny fyzikálních veličin u stěny. Zhušťování sítě by mělo být plynulé. Pokud by byla změna ve velikosti buněk provedena příliš velikou skokovou změnou, projevovalo by se to znatelně na průběhu výpočtu (problémy s konvergencí úlohy) i konečném výsledku výpočtu (chybný výsledek v daném místě výpočtové oblasti).“[10]

### 3.4.1 Kritéria pro posouzení kvality sítě

„Kvalita výpočtové sítě se posuzuje zejména podle:

- Velikosti buněk (s ohledem na modelovaný děj a požadavek na přesnost výpočtu)
- Vhodnost uspořádání buněk v prostoru (např. zhuštění v místech zajímavých z pohledu sledované veličiny) s ohledem na konkrétní typ úlohy
- Kvality buněk (nesouměrnost – *Skewness*, poměr hran (ploch) prvků – *Aspect Ratio*, atd.)

Nejvýznamnějším kritériem pro posouzení kvality buňky je nesouměrnost, kdy se posuzuje, jak hodně se buňka svým tvarem blíží ideálnímu pravidelnému geometrickému tvaru v souladu s odpovídajícím schématem sítě. Pokud je buňka jakkoli deformována, je její kvalita horší. Obecně vyjadřujeme kvalitu každé buňky bezrozměrným číslem v rozsahu od nuly do jedné. Kde „0“ znamená výsledek nejlepší a naopak „1“ výsledek nejhorší (tzn. problematickou buňku pro výpočty). Tato hodnota se nazývá „míra skosení buňky“ (*skewness measure*) nebo též „míra deformace“.



obr. 19 Princip posuzování kvality pro 2D a 3D buňky

Pro posouzení kvality 2D buňky (její deformace) platí vztah

$$Skewness\ measure\ (TRI) = \frac{S_{optimal} - S_{real}}{S_{optimal}} \quad (4)$$

kde  $S_{optimal}$  optimální plocha buňky  
 $S_{real}$  reálná plocha buňky  
*Skewness measure (TRI)* míra deformace buňky, vztahující se ke 2D trojúhelníkovému schématu sítě

U jiných než trojúhelníkových schémat se vychází z obdobné logiky. Výsledná hodnota by neměla přesáhnout 0,85. Pokud by se tak stalo, je třeba schéma sítě upravit, aby nebyla ohrožena realizovatelnost a přesnost výpočtu.

Pro posouzení kvality 3D buňky odpovídající schématu sítě tvořené čtyřstěny platí vztah obdobný.

$$Skewness\ measure\ (TET) = \frac{V_{optimal} - V_{real}}{V_{optimal}} \quad (5)$$

kde  $V_{optimal}$  optimální objem buňky  
 $V_{real}$  reálný objem buňky  
*Skewness measure (TET)* míra deformace buňky, vztahující se ke schématu 3D sítě tvořené čtyřstěny

Výsledná hodnota by neměla přesáhnout 0,9. Pokud by se tak stalo, je třeba opět schéma sítě upravit.“[10]

### 3.5 Implementace metody konečných prvků v počítači

„Obecně lze řešení problému MKP rozdělit na tři fáze:

- 1) Preprocessing – charakteristika problému
  - definice klíčových bodů (*key points*), čar (*lines*), ploch (*areas*), objemů (*volumes*)
  - definice typu elementů (*element type*), a materiálových vlastností (*material properties*)
  - vytvoření sítě (*mesh*)

- množství a charakter zadávaných údajů záleží na složitosti úlohy (1D, 2D, 3D, osová symetrie, apod.)
- 2) Solution – řešení
- přiřazení zátěží (*loads*), omezujících podmínek (*constraints*)
  - řešení soustavy rovnic
- 3) Postprocessing – výpis a zobrazení výsledků
- výpis řešených hodnot v uzlech
  - síly a momenty
  - mechanické deformace
  - isoliniové diagramy polí“[9]

#### 4 Výběr pojistky pro realizaci numerického modelu

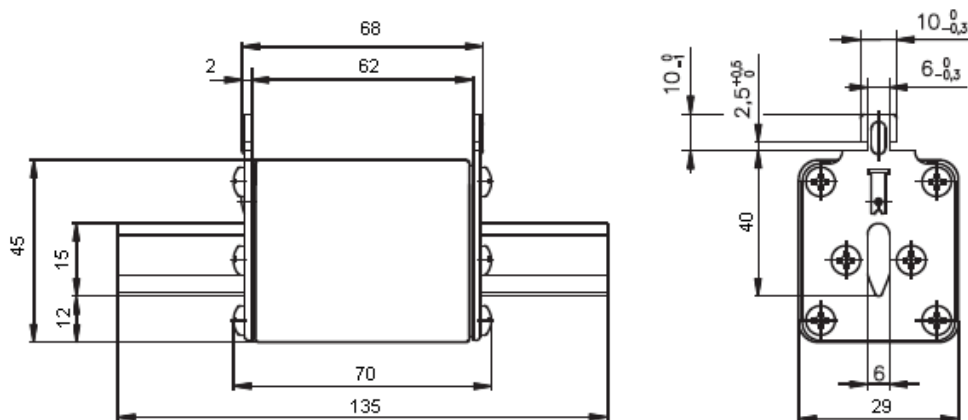
Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem pro tvorbu numerického modelu zvolil nožovou pojistkovou vložku řady PN1 s jmenovitým proudem  $I_N = 63$  A, charakteristikou gG pro jištění vedení, kabelů a dalších zařízení před přetížením a zkratem (výrobce OEZ s.r.o., katalogové označení pojistky: PN1 63A gG, kód: 07225).

Tato pojistka se vyznačuje vysokou vypínací schopností, velkou proudovou omezovací schopností a nízkými hodnotami přepětí vzniklého během působení pojistky. Je vhodná pro použití v pojistkových odpínačích, pojistkových lištách a pojistkových spodcích.

Pojistka je vyráběna v řadě pro jmenovité proudy od 6 do 250 A. Výrobce pro ni udává tyto jmenovité hodnoty:

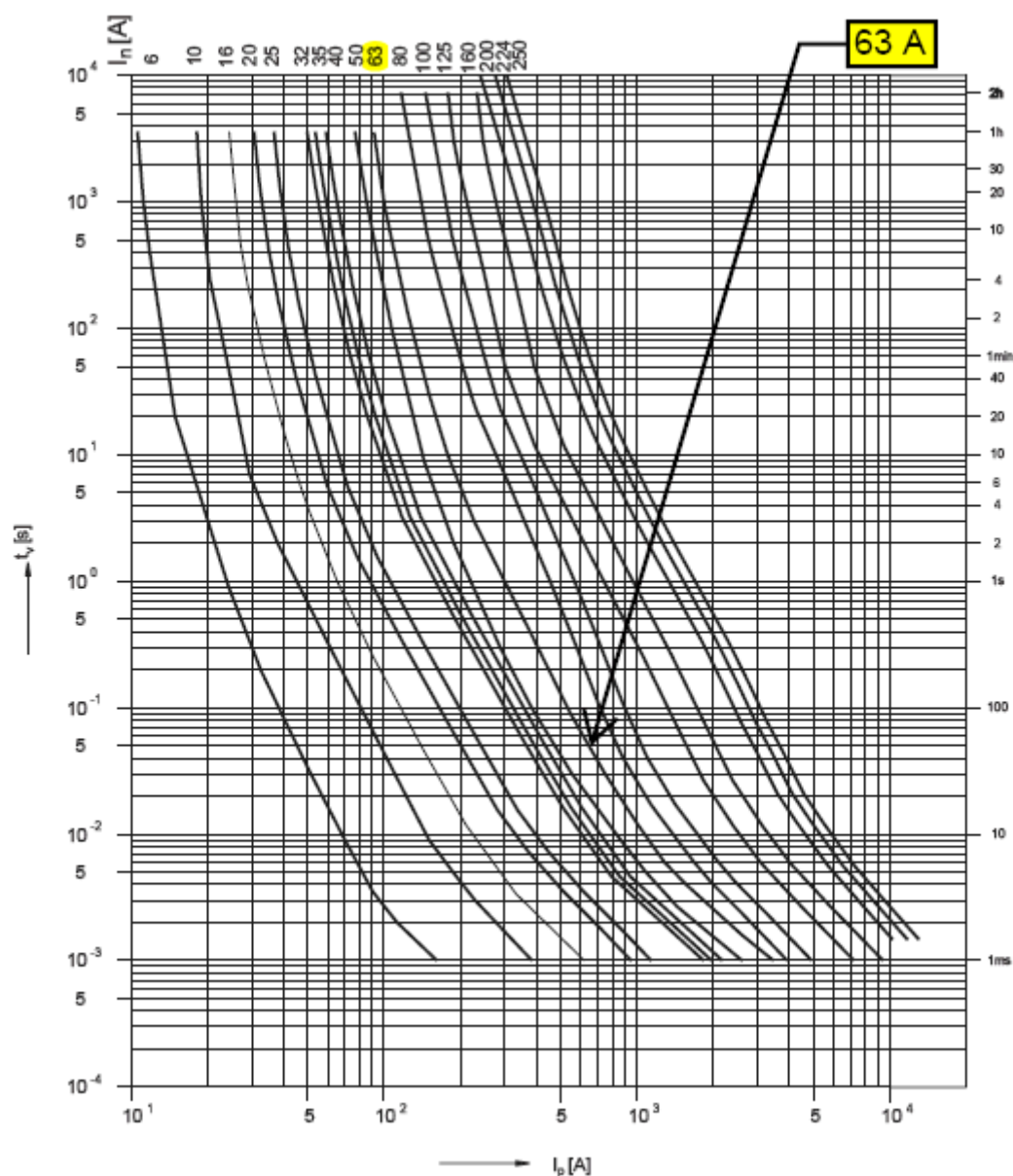
Jmenovitý proud	$I_N$	63 A
Jmenovité napětí	$U_N$	500 V a.c. 250 V d.c.
Vypínací schopnost (efektivní hodnota)	$I_t$	120 kA/500 V a.c. 50 kA/250 V d.c.
Charakteristika		gG
Selektivita		1 : 1,6
Ztráty		6,1 W
Hmotnost		0,22 kg

Rozměry:



obr. 20 Katalogové rozměry (mm) nožové pojistkové vložky PN1 63A gG

#### 4.1 Tavná charakteristika pojistkové vložky PN1 63 A gG



obr. 21 Tavné charakteristiky pojistkových vložek řady PN1 gG (OEZ s.r.o.)

#### 4.2 Informace od výrobce

Těleso pojistky je zhotoveno z materiálu na bázi keramiky (Steatit), konstrukčním materiálem tavného vodiče je čistá elektrotechnická měď. Tavný vodič je zhotoven z pásu tloušťky 0,27 mm. V pásu jsou ražením zhotoveny otvory a je profilován tak, aby bylo definováno místo přetavení. Vodič zajišťující ukazatel stavu je vyroben z tenkého odporového drátu. Tavný pásek společně s vodičem ukazatele stavu jsou zasypány čistým, vysušeným křemičitým pískem

o zrnitosti 0,4 – 0,8 mm. Tavný pásek je připevněn bodovým svářením ke kontaktnímu noži. Tyto jsou zhotoveny také z čisté elektrotechnické mědi a jsou pocínovány z důvodu větší odolnosti proti vnějším vlivům. Čela tavné vložky jsou zhotoveny z materiálu AlMg3,5 řídicího se normou EN AW 5083. Pro zajištění těsnosti vnitřního prostoru, je mezi čelo a těleso pojistky vozeno těsnění na bázi lepenky.

- Roční výroba tohoto typu pojistkové vložky činí u společnosti OEZ s.r.o. zhruba 30 000 ks (údaj za rok 2011)

Požadavky na pojistky nízkého napětí se řídí normami:

- ČSN EN 60269-1 ed. 3 (*Pojistky nízkého napětí – Část 1: Všeobecné požadavky*) [11]
- ČSN 35 4701-2 ed. 2 (*Pojistky nízkého napětí – Část 2: Doplnující požadavky pro pojistky určené pro kvalifikovanou obsluhu (pojistky převážně pro průmyslové použití)*) [12]

Ve smyslu těchto norem je pojistka brána jako kompletní přístroj. Pojistka tedy zahrnuje všechny části, které tvoří kompletní přístroj, tzn. pojistková tavná vložka v kombinaci s pojistkovým spodkem, či odpínačem, odpojovačem, případně pojistkovou lištou.

V rámci uspořádání budoucího času při výpočtu numerického modelu zvolené pojistky, a po konzultaci s vedoucím diplomové práce, jsem se rozhodl do tohoto modelu zahrnout pouze pojistkovou tavnou vložku. Výrazně se tím zkrátí i tak dosti dlouhý čas potřebný k řešení úlohy a budu díky tomu moci provést více variant výpočtu.

Toto zjednodušení výpočtového modelu vyvážím za pomoci zvýšeného koeficientu přestupu tepla do okolí, zadávaného na plochy nožů pojistkové tavné vložky. Touto úpravou by měl být nahrazen odvod tepla z nožů pojistkové tavné vložky přes kontakty pojistkového spodku do něj samotného a do přírodních kabelů. Neuvážení této skutečnosti by vedlo k výsledkům, které by neodpovídaly skutečným tepelným poměrům v pojistkové tavné vložce.

## 5 Měření na nožové pojistce PN1 63A gG

Při tvorbě numerického modelu nožové pojistky bude třeba zadat materiálové parametry jednotlivých komponentů, ze kterých je daná pojistka vyrobena. V tomto případě se jedná o následující veličiny:

- hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- součinitel tepelné vodivosti ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
- měrný elektrický odpor ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
- měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

„Pro elektrické přístroje se všeobecně používá lineární závislosti měrného elektrického odporu na teplotě  $T$ . Tato závislost je obecně dána vztahem

$$\rho = \rho_{ref} \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (6)$$

kde  $\rho_{ref}$  rezistivita při zvolené referenční teplotě  $\vartheta_{ref}$   
 $\alpha$  teplotní součinitel odporu  
 $\Delta \vartheta$  oteplení

Vztah (6) je však pouze zjednodušením mnohem složitějšího vzorce. Skutečná závislost měrného elektrického odporu na teplotě však není lineární. Závislost z předcházejícího vztahu lze použít jen pro teploty do několika set stupňů Celsia, kdy se křivky skutečné a náhradní linearizované charakteristiky téměř ztotožňují. Při vyšších teplotách, až do teploty tavení, by odchylka od skutečného měrného odporu byla již mnohonásobně vyšší. Vztah (6) lze použít u většiny výpočtů v elektrických přístrojích, ovšem při výpočtu tavné charakteristiky pojistky se s linearizací již spokojit nelze, vzniklá chyba by byla příliš vysoká. Skutečná závislost měrného elektrického odporu na teplotě je

$$\rho = \rho_{ref} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta + \beta \cdot \Delta \vartheta^2 + \gamma \cdot \Delta \vartheta^3 + \dots) \quad (7)$$

kde  $\alpha, \beta, \gamma$  atd. teplotní součinitele odporu“[3]

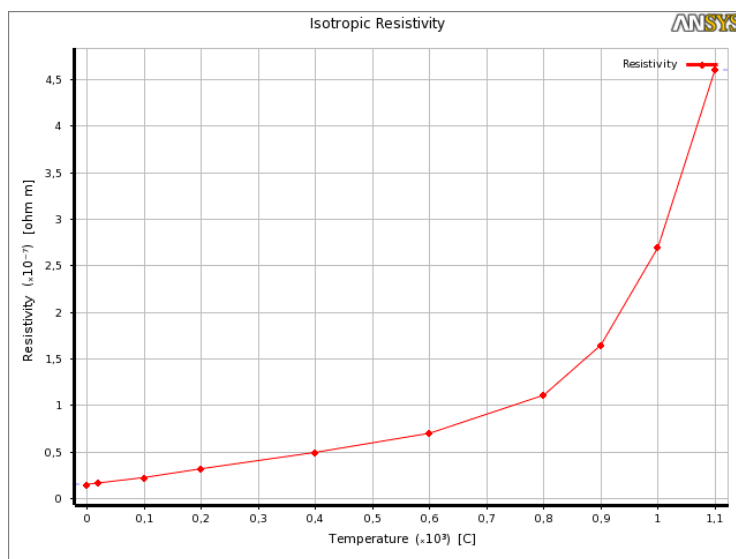
Při výpočtu tavné charakteristiky budu uvažovat závislost měrného elektrického odporu mědi na teplotě dle hodnot získaných experimentálním měřením, které bylo provedeno mým předchůdcem v rámci vypracování jiné diplomové práce, na pásku měděného tavné vodiče. Při měření byla zvyšována teplota tavného vodiče od 100 °C až po destrukci vodiče. Následně byly určeny koeficienty  $\alpha, \beta, \gamma$  a dopočítány hodnoty měrného elektrického odporu. Jeho výsledná velikost v závislosti na teplotě je uvedena v Tab. 1. Přesněji je samotné měření popsáno v lit. [13].



Tab. 1 Závislost měrného el. odporu mědi na teplotě

$T$	$\rho_{\text{Cu}}$	$\lambda$	$c$
(°C)	( $\Omega \cdot \text{m}$ )	( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
0	1,55E-08	386	383
100	2,28E-08	385	386
200	3,22E-08	374	394
400	4,98E-08	364	405
600	7,03E-08	353	416
800	1,11E-07	342	427
900	1,65E-07	337	433
1000	2,69E-07	332	438
1100	4,61E-07	326	444

Pro ostatní materiály použité při výrobě pojistkové vložky jsem potřebné hodnoty materiálových vlastností našel v literatuře (lit. [14] – [23]). V některých případech se vyskytl rozpor v uváděných hodnotách a proto jsem bral v úvahu vždy jen tu velikost dané veličiny, která se shodovala minimálně u dvou literárních zdrojů.



obr. 22 Závislost měrného el. odporu mědi na teplotě

Na největší problém jsem narazil při hledání součinitele tepelné vodivosti křemičitého písku. Údaje v literatuře se lišily v rozmezí 0,1 – 0,34 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) a to se ještě nejednalo o přesně ten typ písku používaného v pojistkové tavné vložce PN1 63A gG, kterou jsem si zvolil pro řešení numerického modelu. Přičemž hodnota součinitele přestupu tepla je právě u písku dosti zásadní, určuje totiž míru chlazení samotného tavného vodiče, přesněji řečeno, odvod tepla tvořeného Jouleovými ztrátami v tavném vodiči z jeho povrchu na povrch tavné vložky. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl určit součinitel tepelné vodivosti křemičitého písku vlastním měřením.

## 5.1 Měření materiálových vlastností křemičitého písku

Pro potřeby měření tepelné vodivosti křemičitého písku mi byl od výrobce pojistkové tavné vložky, OEZ s.r.o., poskytnut vzorek křemičitého písku zrnitosti 0,4 – 0,8 mm. Jednalo se přesně o ten typ křemičitého písku, který se používá ve mnou zvolené pojistkové tavné vložce.

Samotné měření bylo prováděno na půdě Oddělení laboratorního výzkumu geomateriálů, Ústavu geoniky Akademie věd České republiky, kde mi byly poskytnuty prostory pro měření a měřicí vybavení.

K měření jsem zvolil multifunkční měřicí přístroj ISOMET 2104. Jedná se o přenosný přístroj pro přímé měření součinitele tepelné vodivosti ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ ), měrné objemové tepelné kapacity ( $J \cdot m^{-3}K^{-1}$ ), součinitele teplotní vodivosti ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) a teploty (K). Využívá nestacionární měřicí metodu, která redukuje dobu měření na 10 – 16 minut. Umožňuje připojení dvou typů sond, jehlové (pro měření sypkých materiálů) a plošné (pro pevné materiály). Jednotlivé sondy jsou navíc vyráběny pro různé rozsahy měření. V každé sondě je zabudovaná paměť, ve které jsou uloženy její kalibrační konstanty. Měření je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou pak použity k výpočtu měřených veličin.

Průběh samotného měření byl následující:

- Do odměrného válce (600 ml) byl nasypán a lehce utřepán křemičitý písek
- Následovalo připojení měřicí sondy k přístroji ISOMET 2104  
Pro měření jsem zvolil jehlovou sondu s měřicím rozsahem 0,2 – 1,0 ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ )
- Zavedení měřicí sondy do vzorku křemičitého písku  
Zde je třeba dbát na to, aby se měřicí sonda nedotýkala dna odměrného válce a taktéž aby nebyla zasunuta celá, zhruba 4 cm hrotu měřicí sondy by měly zůstat nad hladinou písku. Měla by být svisle zavedena do středu odměrného válce, aby nedocházelo ke zkreslení naměřených výsledků následkem dotyku sondy s jeho stěnou.
- Následně jsem pomocí menu měřicího přístroje nastavil celkem 5 měření.  
Mezi jednotlivými měřeními byla zvolena časová prodleva 5 sekund. Větší počet měření jsem nastavil z důvodu snahy o větší přesnost. Výslednou hodnotu budu brát jako průměr z těchto pěti měření.
- Spuštění měření

Podmínky při měření:

- Teplota: 24 °C
- Tlak: 1006 hPa
- Relativní vlhkost: 36 %

Seznam použitých měřicích přístrojů:

- ISOMET 2104 - Heat transfer analyzer (v.č. 3021050410)  
+ Jehlová měřicí sonda s rozsahem 0,2 – 1,0 W · m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
- Multimetr CEM DT-61 (v.č. 11059993)
- Digitální váha KERN EW3000-2M (v.č. 047630164)

Naměřené hodnoty jsou následující:

Tab. 2 Materiálové vlastnosti křemičitého písku

$a$	$\lambda$	$c_\rho$	$T$
(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	(W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	(J·m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	(°C)
1,98E-07	0,303	1,53E+06	26,26
1,89E-07	0,289	1,53E+06	28,54
1,90E-07	0,291	1,53E+06	29,29
1,91E-07	0,292	1,53E+06	29,79
1,88E-07	0,287	1,53E+06	29,85
Průměrná hodnota			
1,91E-07	0,292	1,53E+06	28,75

Dále jsem změřil hmotnost odměrného válce naplněného pískem (po předchozím odvážení prázdného odměrného válce a vytárování váhy). Objemu 600 ml odpovídá hmotnost písku 0,978 kg. Po přepočtu dostáváme hodnotu pro hustotu křemičitého písku

$$\rho_{\text{písku}} = 1630 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

Nyní si můžu podle jednoduchého vzorce vypočítat hodnotu pro měrnou tepelnou kapacitu křemičitého písku  $c$

$$c = \frac{c_\rho}{\rho_{\text{písku}}} = \frac{1,53 \cdot 10^6}{1630} = 938 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

kde  $c_\rho$  měrná objemová tepelná kapacita



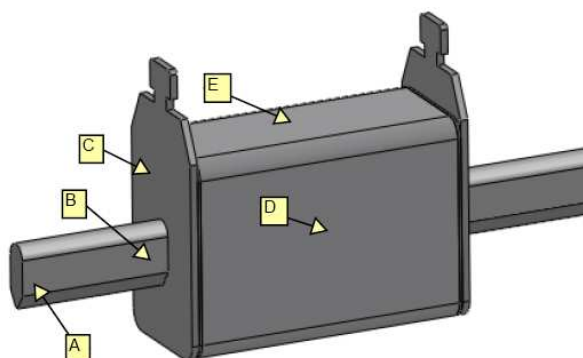
obr. 23 Měření součinitele tepelné vodivosti písku

## 5.2 Měření oteplení pojistky

Při řešení numerického modelu pojistky, bude důležité znát skutečné tepelné poměry na reálné pojistce. Srovnání hodnot vypočtených s hodnotami naměřenými, mi poskytne zpětnou vazbu a budu tak moci numerický model nastavit tak, aby docházelo ke shodě oteplení modelu s oteplením pojistkové vložky v reálném provozu.

Z výše uvedených důvodů jsem se rozhodl realizovat měření, při němž budu sledovat na jakou teplotu se pojistková vložka ohřeje při provozu na jmenovitý proud  $I_N = 63 \text{ A}$ . Měření budu provádět do té doby, než dojde k ustálení teploty.

Pojistková vložka bude při měření umístěna v pojistkovém spodku SPF 1 (výrobce OEZ s.r.o.). Teplota bude snímána pomocí spojení termočlánků-multimetr na těchto místech:



obr. 24 Označení míst pro snímání teploty

Podmínky při měření:

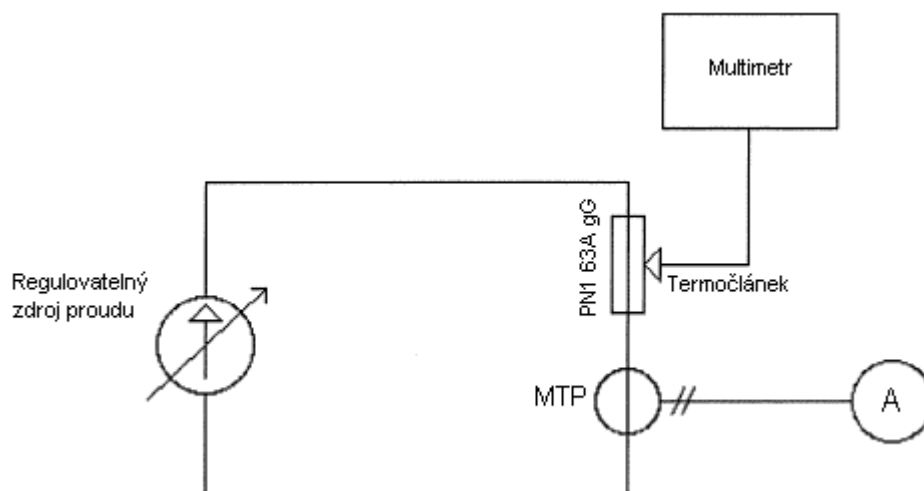
- Teplota: 22 °C
- Tlak: 954 hPa
- Relativní vlhkost: 37 %

Seznam použitých měřicích přístrojů:

- Jednofázový zdroj napětí a proudu: (v.č.: 5200-363/25 016)
- Multimetry: Metex M-3860M (v.č.: 926965)  
CEM DT-61 (v.č. 11059993)
- Klešťový A-metr ESCORT ECT-670 (AC\*DC CURENT TRANSDUCER)
- Stopky: Nokia 6300

Pojistková vložka i spodek byly uloženy v laboratoři ve které probíhalo měření dostatečně dlouhou dobu před samotným měřením. Jako počáteční teplotu na povrchu pojistkové vložky budu tedy uvažovat teplotu okolí (22°C). Při měření bylo nutné hlídat hodnotu proudu, protože laboratorní zdroj nedokázal udržet nastavenou hodnotu a bylo nutné provádět dorovnání na jmenovitou hodnotu proudu pojistky (63 A). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Pracoviště bylo zapojeno dle následujícího schématu:



obr. 25 Zapojení pracoviště při měření teploty

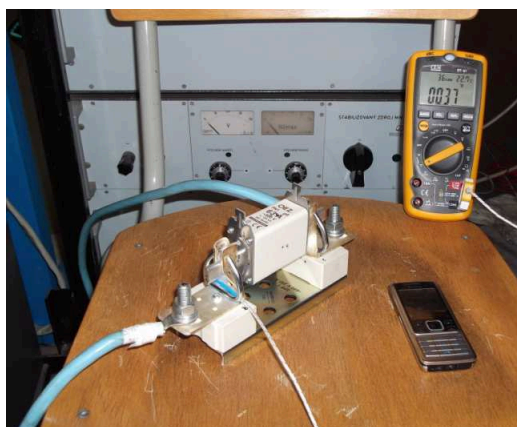
Zvolená metoda měření (multimetr-termočlánek) není pro tento typ úlohy zcela nejvhodnější, nicméně jiné řešení nebylo k dispozici a pro naše účely tato varianta postačuje. Jde o to, mít rámcový přehled, která část pojistkové vložky se nejvíce vyhřívá a na jakou teplotu, což toto měření splnilo. Pokud by byla požadována větší přesnost, navrhol bych pevné připevnění teplotních čidel k tělesu pojistky a přes převodník pak zaznamenávat teplotu ve větším počtu

kroků do počítače. Odstranil by se tak nedostatek z mého měření, kdy nebylo zaručeno že teplotu odečítám pokaždé přesně na tom samém místě. Navíc jsem musel vždy chvíli počkat, než došlo k ustálení teploty na termočlánku.

Tab. 3 Naměřené teploty

Čas	Měřicí bod / teplota (°C)				
(min)	A	B	C	D	E
0	22	22	22	22	22
2	25	26	26	25	25
5	27	29	29	28	28
8	28	29	29	29	29
10	29	31	31	30	30
15	30	32	33	33	35
20	32	33	35	34	36
25	33	35	37	37	37
30	34	36	37	37	38
35	35	37	38	38	39
40	36	37	38	39	40
45	36	37	39	39	40
50	37	38	39	40	41
55	37	39	39	41	42
60	37	39	40	41	42
65	38	39	40	41	43
75	38	39	41	42	43
90	39	40	42	43	44
105	39	40	42	43	44
135	39	40	42	43	44

Z naměřených hodnot je patrné, že největší teploty bylo dosaženo na tělese pojistky (steatit) a to 44 °C. V rámci řešení numerického modelu se budu snažit dosáhnout při jmenovitém proudu stejné hodnoty na místech popsanych v tomto měření.



obr. 26 Měření teploty na pojistce

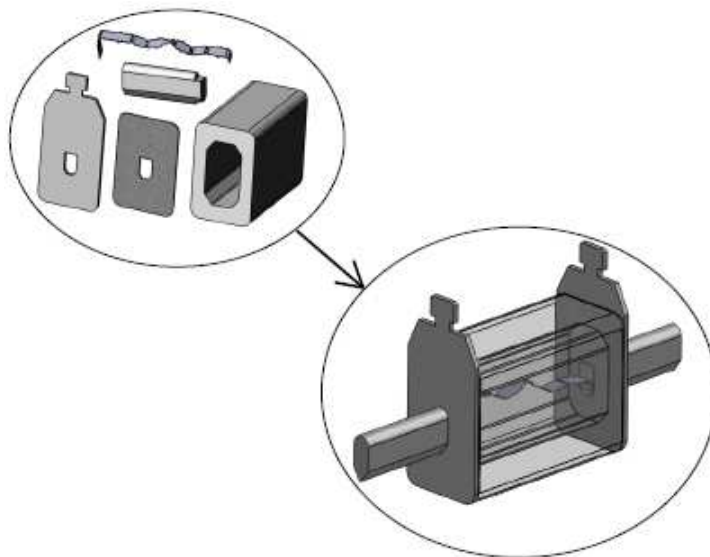
## 6 Výpočet tavné charakteristiky pojistky

### 6.1 Tvorba modelu pojistkové vložky

Pro tvorbu modelu pojistkové tavné vložky jsem využil 3D konstrukční software SolidWorks Premium 2010. Jedná se o parametrický 3D modelář, který umožňuje objemové a plošné modelování, práci s rozsáhlými sestavami a generování výrobních výkresů. Vybral jsem si jej pro jeho výhodu v intuitivním ovládání a z důvodu, že umožňuje plnou asociativitu mezi dílem, sestavou a výkresem. Asociativita mezi dílem, sestavou a výkresem znamená, že změny provedené v jednom, se promítnou do všech dalších. Uvedenou vlastnost jsem zejména ocenil při úpravách tavného vodiče.

Samotné tvoření modelu probíhalo ve dvou krocích. Nejprve jsem vytvořil 3D model každého jednotlivého dílu, ze kterého se pojistková vložka skládá (tělo pojistky, tavný vodič, čela, nože, těsnění) a následně tyto díly vložil do sestavy (kompletní pojistková vložka). Jediná část, která se v této fázi modelu ještě nevyskytuje, a která bude dotvořena v pozdějších krocích řešení, je křemičitý písek.

K uvedenému je třeba podotknout, že vytvořený model v sobě skrývá určitá zjednodušení. Tyto by však na výsledek neměly mít vliv, protože se jedná z *pohledu řešené úlohy* o zanedbatelné úpravy. Jedná se o vynechání: odporového drátku ukazatele stavu, vrutů určených k připevnění čel pojistkové vložky k jejímu tělesu a nemodelování prolisů v těchto čelech. Uvedené úpravy pojistkové tavné vložky byly provedeny z důvodu snadnější tvorby výpočtové sítě v dalších krocích.



obr. 27 Postup tvorby modelu pojistkové tavné vložky v SolidWorks

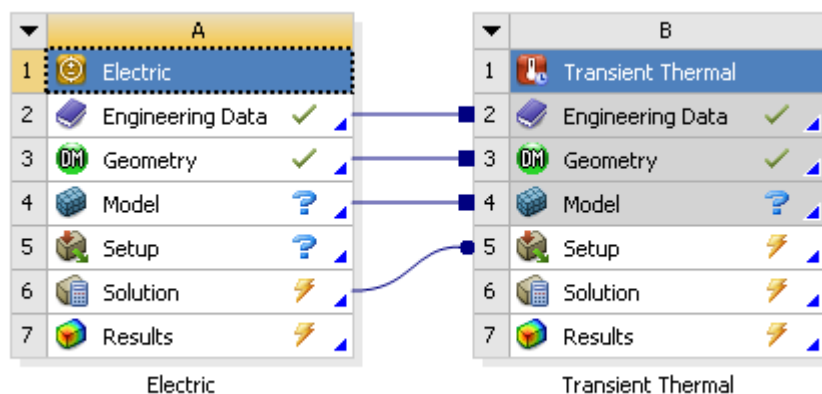
## 6.2 Řešení modelu v Ansys Workbench

K samotnému výpočtu tavné charakteristiky byl zvolen software *Ansys Workbench*. Tento software slouží jako jakési univerzální rozhraní pro celou řadu dalších programů, které se nacházejí v programové nabídce *Ansys*. Výhodou tohoto rozhraní je podobné ovládání ve všech programech implementovaných v tomto prostředí. Je jej možné provozovat pod celou řadou operačních systémů a to jak v 32bitové tak i v 64bitové verzi.

Řešení probíhalo na počítači o těchto parametrech

- Procesor Intel Core i3-2105 (4 CPUs); 3,1 GHz
- 4078 MB RAM
- Grafická karta NVIDIA GeForce 8400GS, 1024 MB
- Operační systém Microsoft Windows XP Professional x64 Edition

Z nabídky Ansys Workbench jsem si vybral **elektrickou analýzu** (*Electric*) a z ní budu převádět data do analýzy **přechodné tepelné** (*Transient Thermal*). Obě dvě se automaticky propojí a elektrická analýza bude posílat data ze svého řešení do analýzy tepelné, která s nimi bude dále pracovat.



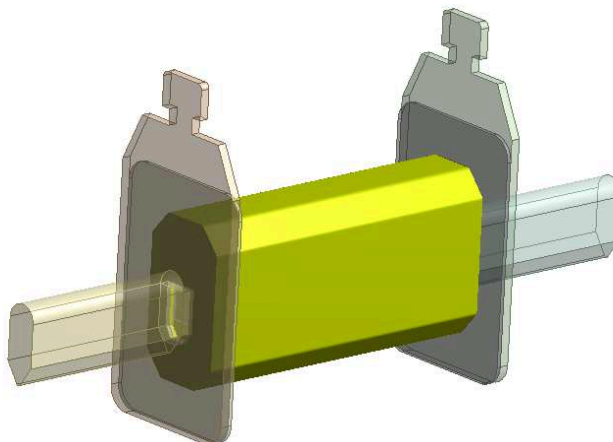
obr. 28 Výběr analýzy pro řešení modelu

Po výběru analýzy je třeba nahrát model pojistkové vložky vytvořený v programu SolidWorks do geometrie elektrické analýzy. Ansys Workbench podporuje formát souboru, ve kterém je uložený model ze SolidWorks, tudíž s importem není žádný problém. Je však třeba dát pozor, aby byla geometrie nahrána jako *Add Frozen* („zmražená“). To zajistí, aby jednotlivé díly modelu (tavný vodič, nože, čela pojistky,...) zůstaly samostatné a nedošlo k jejich „slepení“. Umožní to později přiřadit k jednotlivým dílům pojistky jejich materiálové vlastnosti.

Nyní je potřeba dotvořit v modelu pojistky poslední část, která mu ještě chybí, a to objem, který bude reprezentovat křemičitý písek. Jeho vytvoření se provede funkcí *Enclosure*, která kolem modelu pojistkové vložky vytvoří obal a zároveň vyplní doposud prázdné místo písku.

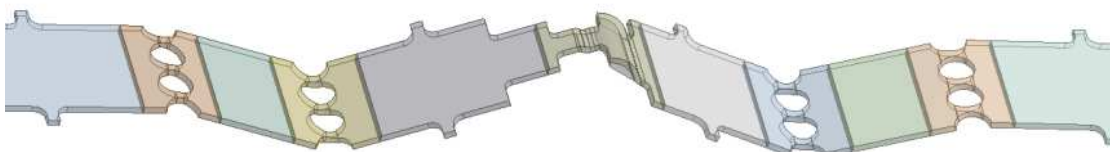


Okolní obal v tomto případě není k výpočtu třeba, tudíž ho potlačím funkcí „*Suppress Body*“ (tzn. nebude na něj brán při výpočtu zřetel) a zůstane mi tak již kompletní pojistková vložka.



obr. 29 Vytvoření objemu pro křemičitý písek

V geometrii je třeba ještě upravit tavný vodič. Je to z toho důvodu, aby se při pozdější tvorbě sítě, mohla tato síť „zhustit“ v místech z hlediska výpočtu důležitých (proudovodné úžiny na tavném vodiči).

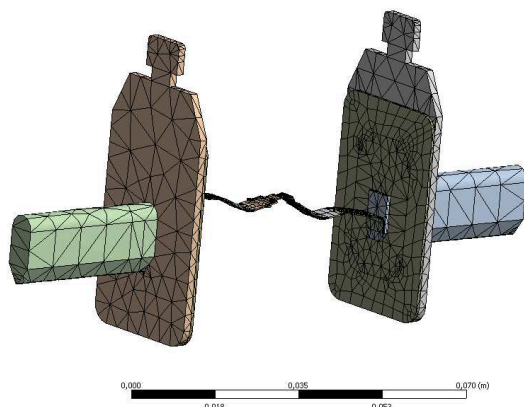


obr. 30 Tavný vodič rozdělený na více částí

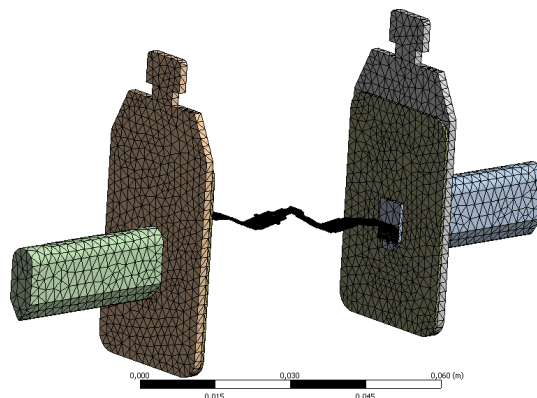
V tuto chvíli je geometrie pro výpočet kompletní a lze přistoupit k tvorbě výpočetní sítě. V první fázi nechávám její tvorbu na samotném programu, nicméně, jak je patrné z obr. 31 její kvalita není z pohledu řešené úlohy postačující. Obvykle se požaduje, aby napříč každou částí modelu byly alespoň tři uzly sítě, což v tomto případě není splněno. Navíc při průchodu proudu tavným vodičem se dá předpokládat největší proudová hustota ve středovém zúžení a v děrovaných místech tohoto vodiče, tudíž nás budou tyto místa obzvlášť zajímat a bylo by třeba mít v jejich okolí výpočetní síť dostatečně hustou, aby numerický model zachytil zkoumané fyzikální pochody s dostatečnou přesností a nevnášel do výpočtu chybu.

Z uvedených důvodů jsem se rozhodl pro úpravu výpočetní sítě dle vlastního uvážení. Nejmenší velikost elementů byla zvolena v místech tavného vodiče a v jeho středovém zúžení. Dále byla nastavena relevance tvorby sítě na hodnotu 50 (z možného rozmezí -100 až 100). Relevance tvorby sítě znamená, že se bude výpočetní síť tvořená v modelu, snažit přizpůsobit

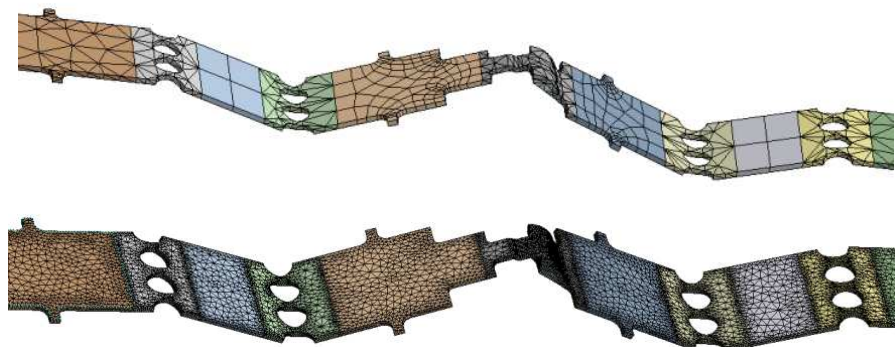
charakteru řešené úlohy, a to tím více, čím větší hodnota relevance se zadá. Pokud by se např. řešila úloha odolnosti nosníku proti ohybu, výpočetní síť by se automaticky vytvořila hustější v místech u okrajů nosníku, protože tam se předpokládá největší namáhání ohybovým momentem. Na obr. 32, 33, 34, je vidět výpočetní síť po úpravě velikosti elementů a zvýšení její relevance. Negativem zmíněné úpravy je navýšení počtu uzlů (*Nodes*) a elementů (*Elements*) sítě, čímž se prodlouží doba potřebná k výpočtu úlohy. V zájmu přesnosti výsledků to je však nyní akceptovatelné. Celý model je po úpravách velikosti elementů pokryt 619 345 uzly a 456 494 elementy.



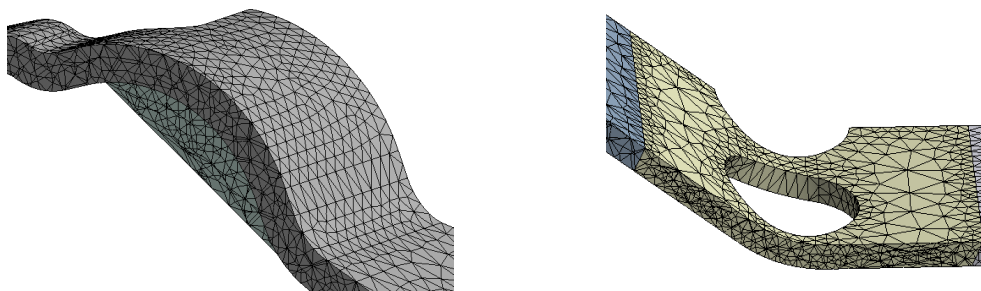
obr. 31 Síť vytvořená automaticky



obr. 32 Síť po úpravě velikosti elementů



obr. 33 Srovnání sítě na tavném vodiči před a po úpravě velikosti elementů



obr. 34 Detail výpočetní sítě na tavném vodiči

### 6.2.1 Zadání materiálových vlastností

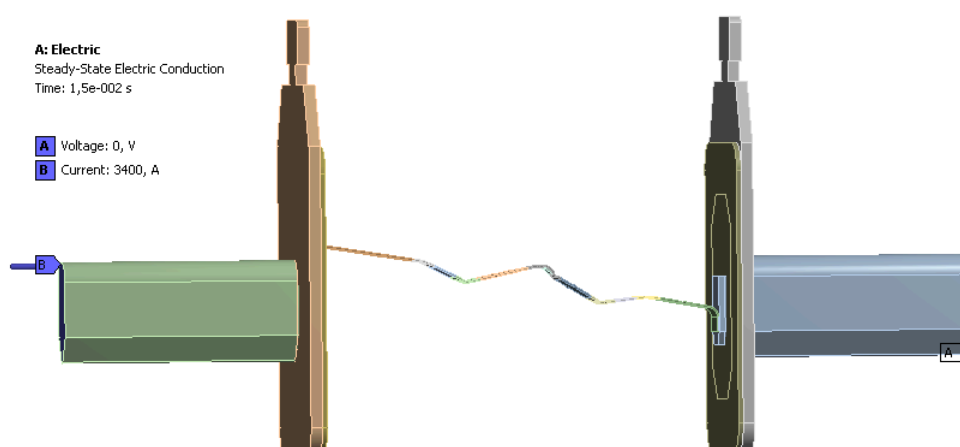
Po vytvoření sítě je třeba zadat materiálové vlastnosti jednotlivých dílů pojistkové vložky. Jejich hodnoty jsem převzal z literatury a pro křemičitý písek je určil měřením, které je popsáno v předchozí části. Soupis všech materiálů použitých v numerickém modelu je uveden v tab. 4.

Tab. 4 Materiálové vlastnosti jednotlivých částí modelu

Materiál	Část modelu	Density	$\lambda$	$c$	$\rho$
		( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	( $\Omega\cdot\text{m}$ )
Měď	Tav. Vodič, Nože	8950	Tab. 1	Tab. 1	Tab. 1
Cín	Cínová kapka	7265	66,8	227	1,15E-07
EN AW 50 83	Čela pojistky	2660	140	900	5,26E-08
Křemičitý písek	Písek	1630	0,292	938	-
Steatit	Těleso pojistky	2750	1,9	2100	-
Lepenka	Těsnění	1200	0,18	1700	-

### 6.2.2 Zadávání proudu a napětí

Hodnotu proudu budu do modelu zadávat přímo. Ve většině případů je poruchový nadproud charakterizován svou ustálenou hodnotou a tudíž při zadávání proudu protékajícího pojistkou, využiji základní definice efektivní hodnoty střídavého proudu, která říká, že efektivní hodnota střídavého proudu vyvolá stejné tepelné účinky jako stejná hodnota stejnosměrného proudu. Budu tedy zadávat konstantní velikost stejnosměrného proudu. Provedu to tak, že na vstupní plochu jednoho nože zadám nulový potenciál a na vstupní plochu druhého nože přímo hodnotu zvoleného proudu. Pro výpočet byly zvoleny tyto hodnoty proudu: 3400, 1100, 520, 300, 200, 180, 135, 105, 95, 90, 63 A.



obr. 35 Zadávání proudu a potenciálu do modelu

### 6.2.3 Definování přestupu tepla do okolí

Poslední částí tvorby modelu je nastavení vnější teploty a zadání součinitele přestupu tepla do okolí. Tento parametr se zadává na všechny vnější (hraniční) plochy a to z toho důvodu, aby bylo zohledněno šíření tepla i vně pojistkové vložky. Součinitel přestupu tepla do okolí je závislý na teplotě, na materiálu ze kterého teplo vystupuje, kvalitě a barvě povrchu a také na umístění plochy v prostoru (tepelný vztlak). Teplotu okolí nastavuji na 20 °C, což je hodnota, kterou udává norma ČSN EN 60269-1 ed. 3, pro měření na pojistkách.

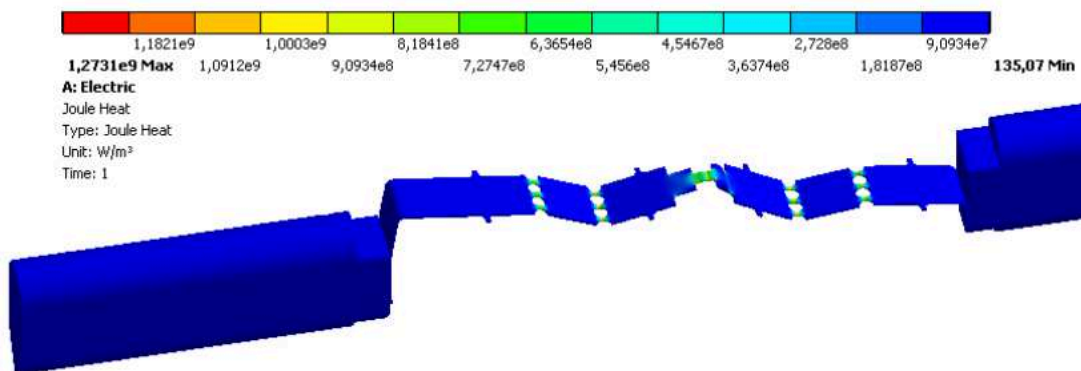
Cílem při výpočtu bude nastavit součinitele přestupu tepla do okolí tak, aby se modelovaná pojistková vložka při průchodu jmenovitého proudu ( $I_N = 63$  A) zahřívala tak, jak bylo zjištěno, že se zahřívá skutečná pojistková vložka při dříve popsáném měření. Tímto nastavením se zajistí dříve zmíněné zohlednění absence pojistkového spodku v modelu.

### 6.2.4 Výpočet

Nyní jsou nastaveny všechny potřebné parametry modelu a je možno spustit výpočet. U tohoto modelu trval samotný výpočet, v závislosti na délce sledovaného intervalu, od 15 min. do 3 hodin. Přičemž kratší dobu trval výpočet velkých nadproudů a zkratu. U menších nadproudů bylo třeba řešit delší časový interval, což je logické a vyplývá to z principu působení pojistky, kdy při menším nadproudu trvá delší dobu než je dosaženo teploty tavení tavného vodiče. U výpočtu oteplení při jmenovitém proudu pojistkou pak výpočet trval nejdéle. Hledání součinitelů přestupu tepla do okolí, tak aby došlo ke stejnému oteplení modelu jako reálné pojistkové vložky tudíž zabralo nejdelší čas.

Po nastavení přestupu tepla do okolí tak, aby došlo k výše zmíněné shodě, jsem začal s výpočtem jednotlivých bodů pro sestrojení tavné charakteristiky. Hodnoty proudu na vodorovné ose pro sestrojení této charakteristiky jsou dány (viz volba proudů na předchozí straně), jde ale o to k těmto proudům vypočítat dobu tavení vynášenou na svislé ose. Tuto dobu získám tak, že budu odečítat po jakém čase se tavný vodič pojistkové vložky ohřeje na teplotu tavení (pro měď 1083 °C). Takto budu postupovat pro časy v řádu sekund. Pokud se předpokládaná doba tavení prodlouží na minuty (určeno z tavné charakteristiky výrobce), budu předpokládat, že se již uplatní vliv cínu naneseného ve středu tavného vodiče, který začne po dosažení své teploty tání difundovat do tavného vodiče a vzniklá slitina bude mít teplotu tavení v rozmezí 360 – 400 °C.

Při výpočtu pro jmenovitý proud se nabízí možnost ověřit, zda je vytvořený model navržen správně, přesněji řečeno, zda je navržena správně jeho proudovodná dráha (nože pojistky, tavný vodič). Pokud si necháme vykreslit Jouleovo teplo (*Joule Heat*,  $W \cdot m^{-3}$ ) vznikající průchodem jmenovitého proudu (obr. 36), proudovodnou dráhu si rozdělíme na úseky kde je jeho velikost přibližně stejná a patřičnou velikost Jouleova tepla v daném úseku vynásobíme jeho objemem, dostaneme po sečtení všech úseků ztráty které na pojistkové vložce vznikají. Výslednou hodnotu pak můžeme porovnat s údajem výrobce.



obr. 36 Určení ztrát na pojistkové vložce

Po provedení výše popsaného postupu, vyšla velikost ztrát na pojistkové vložce 6,07 W. Výrobce udává hodnotu 6,1 W. Takto malou odchylku mezi hodnotou vypočtenou a hodnotou udávanou výrobcem považuji v rámci modelu za zanedbatelnou.

Při jmenovitém proudu bylo dále vypočteno následující rozložení sledovaných veličin.

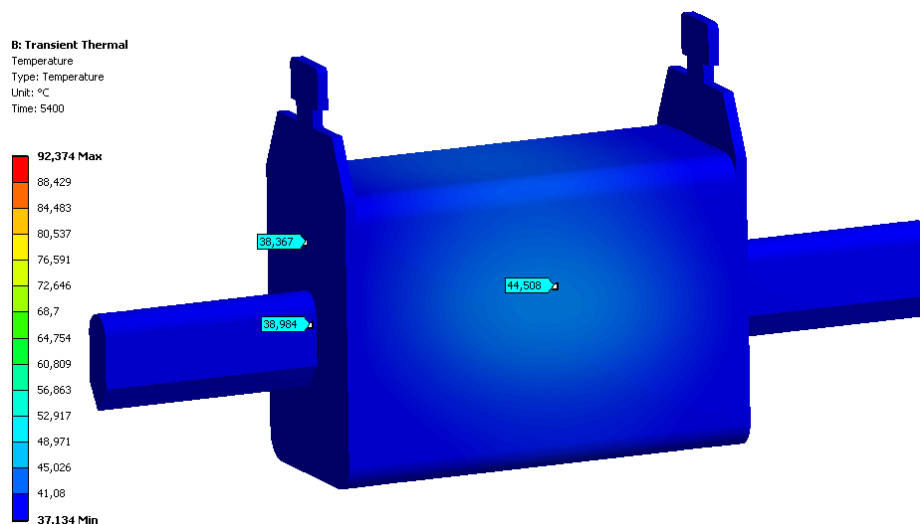
*Temperature* – Teplota

*Total Current Density* – Proudová hustota

*Total Electric Field Intensity* – Intenzita elektrického pole

*Electric Voltage* – Elektrické napětí

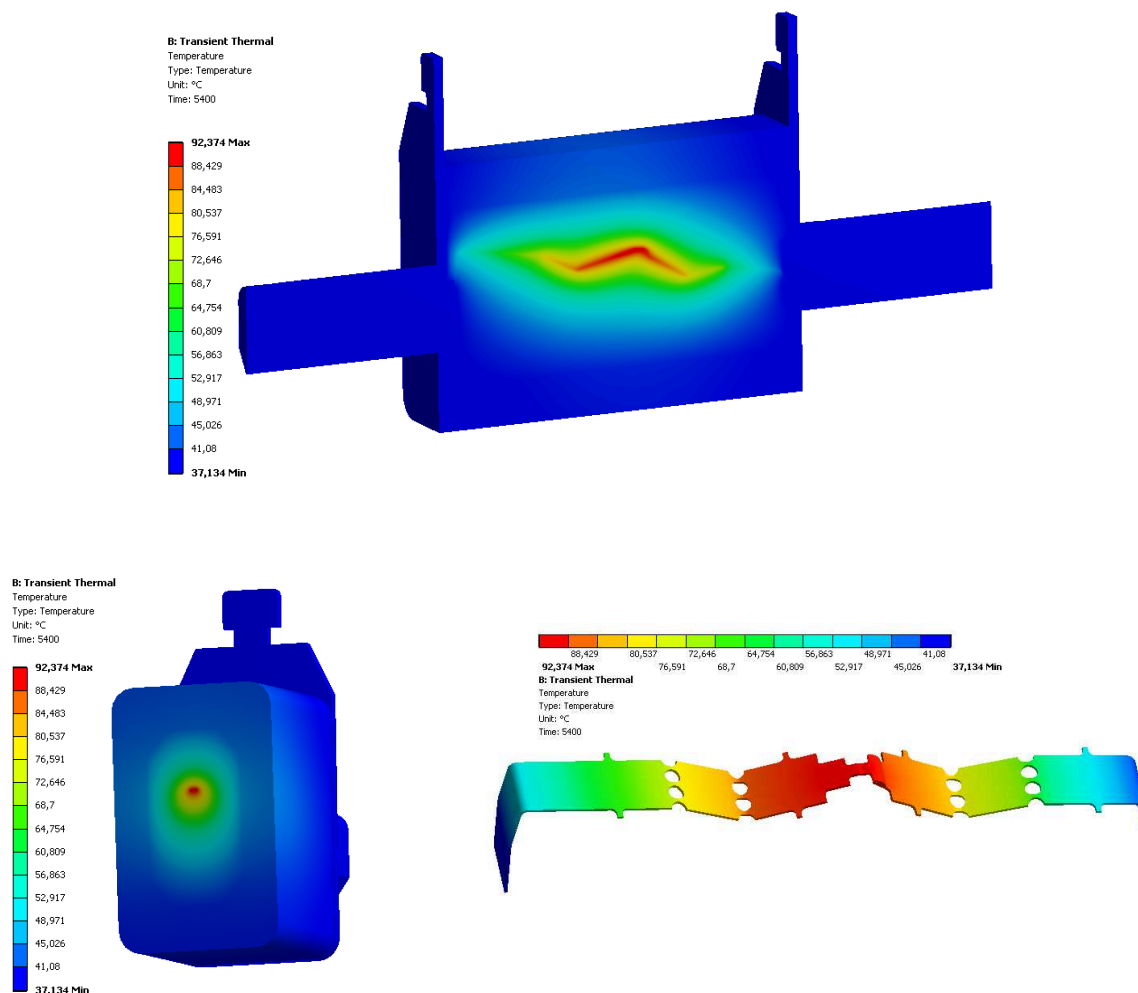
*Joule Heat* – Jouleovo teplo



obr. 37 Teplota na vnějších částech pojistkové vložky při  $I_N$

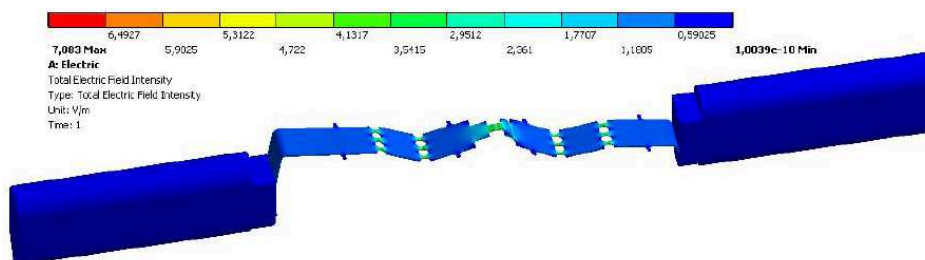
Na obr. 37 je vidět rozložení teploty na povrchu tavné vložky při průchodu jmenovitého proudu. Toto rozložení je stejné jako na reálné pojistce při měření oteplení.

Obr. 38 ukazuje rozložení teploty uvnitř pojistkové vložky a na tavném vodiči při průchodu jmenovitého proudu. Lze si všimnout, že teplota na tavném vodiči se rozložila dle teoretických předpokladů, kdy nejvyšších hodnot je dosaženo ve středu tavného vodiče. To je dáno profilováním tohoto vodiče a také tím, že ze středu pojistkové vložky je nejkomplicovanější odvod tepla.

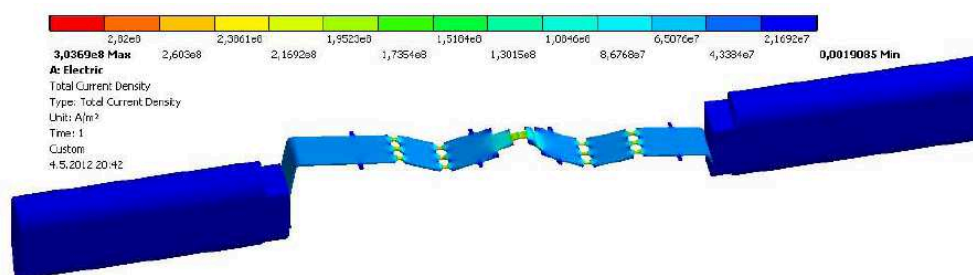


obr. 38 Teplota uvnitř pojistkové vložky a na tavném vodiči při  $I_N$

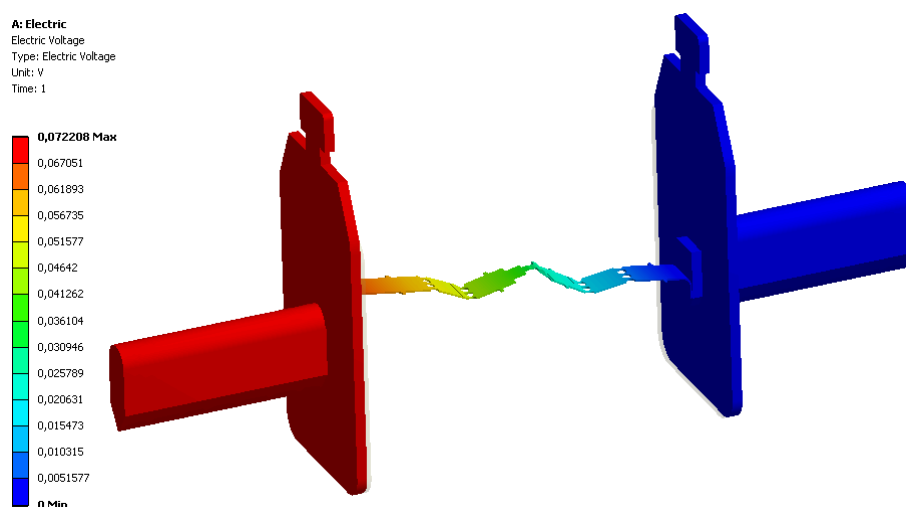
Pro názornost uvádím i velikosti ostatních sledovaných fyzikálních veličin při průchodu jmenovitého proudu, intenzitu elektrického pole, proudovou hustotu a napětí.



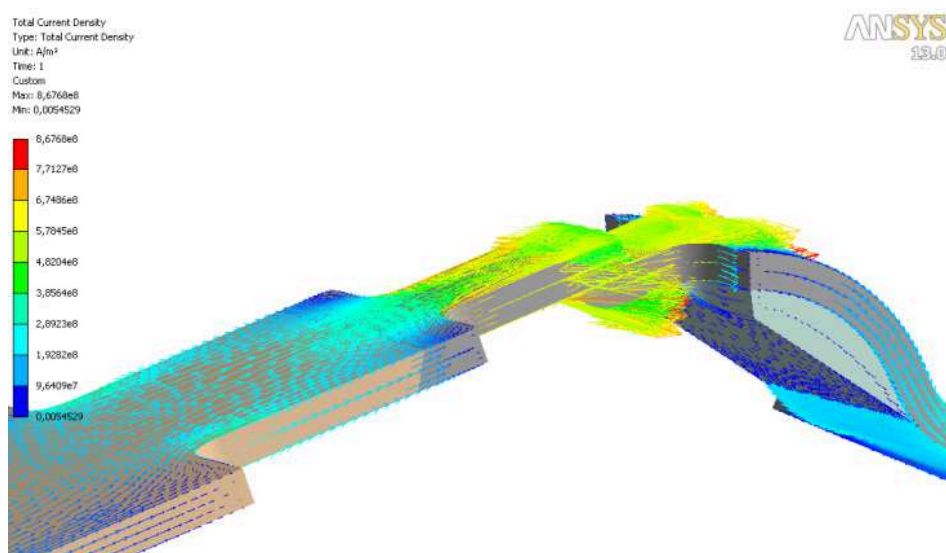
obr. 39 Intenzita elektrického pole při  $I_N$



obr. 40 Proudová hustota při  $I_N$



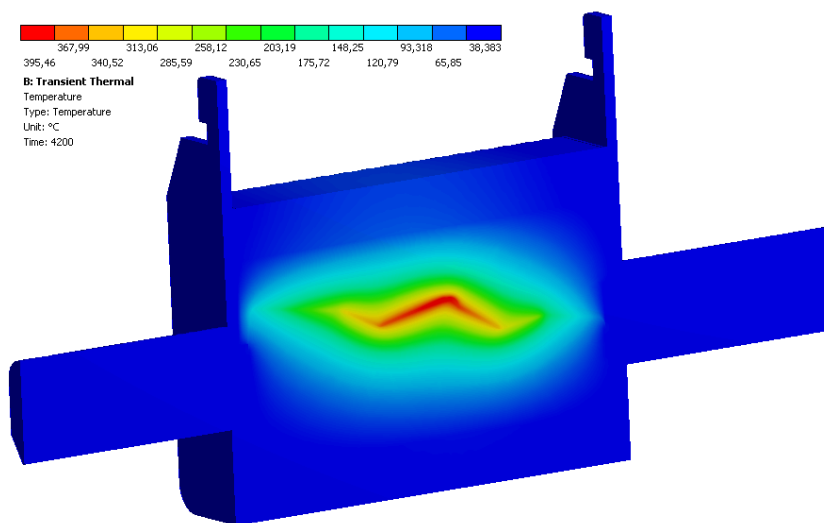
obr. 41 Rozložení napětí při  $I_N$



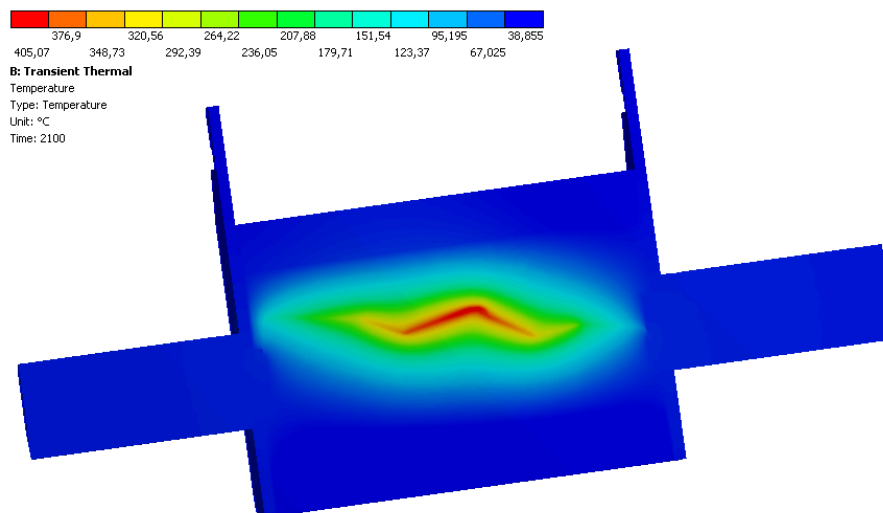
obr. 42 Ukázka vykreslení proudové hustoty ve středu tavného vodiče pomocí vektorů ( $I = 180 \text{ A}$ )



Obrázky níže popisují dosažené výsledky při modelování jednotlivých bodů tavné charakteristiky. Uvádím zde pro názornost pouze pojistkovou tavnou vložku v řezu, aby bylo dobře viditelné rozložení teploty v celém tělese této pojistkové vložky a detail tavného vodiče, pro ukázkou jakých je na něm dosahováno teplot v daném čase a velikosti procházejícího proudu. Je však třeba podotknout, že v některých případech jsou vykresleny velikosti teploty, které se v reálné pojistkové vložce nevyskytnou na vodiči v pevném stavu. Nad hodnotou teploty tavení mědi (1083 °C) bude již v pojistkové vložce hořet oblouk, tento model jej však simulovat neumí.

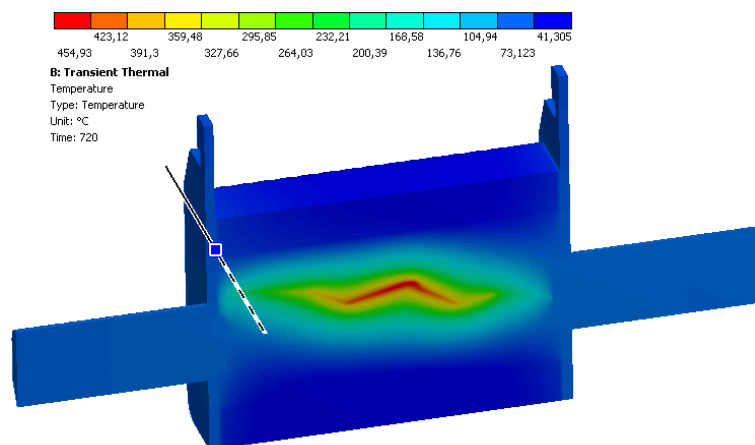


obr. 43 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 90 A

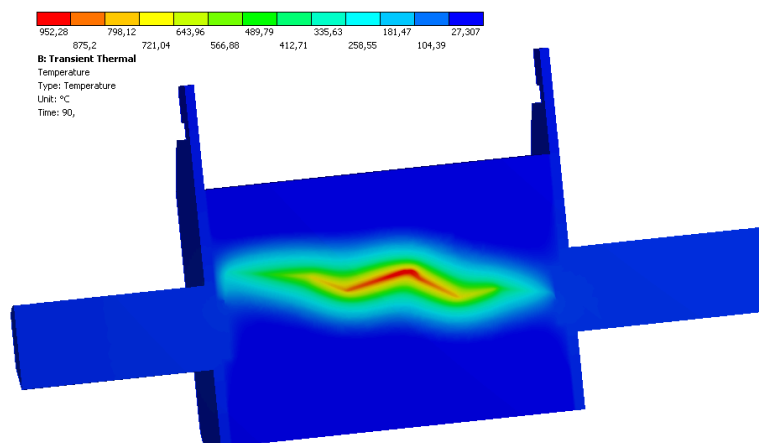


obr. 44 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 95 A

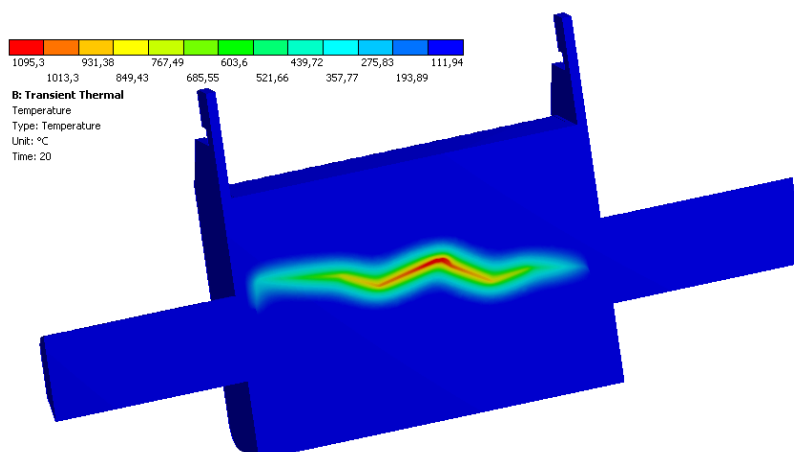




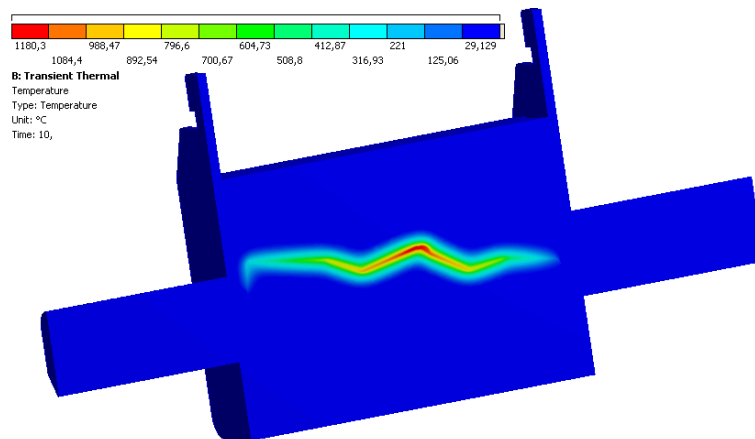
obr. 45 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 105 A



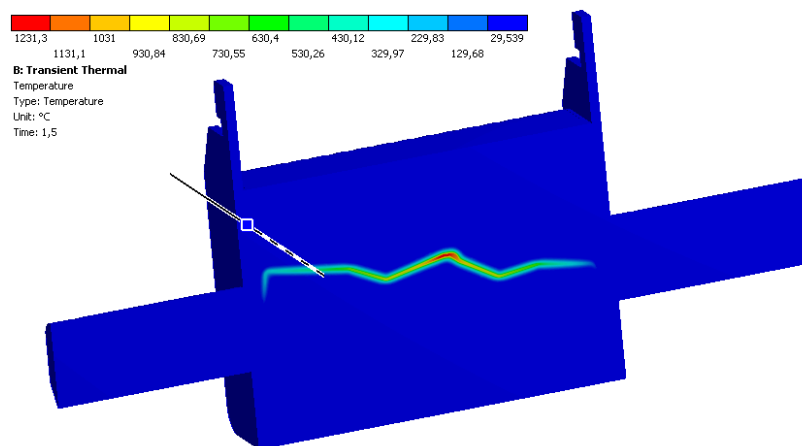
obr. 46 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 135 A



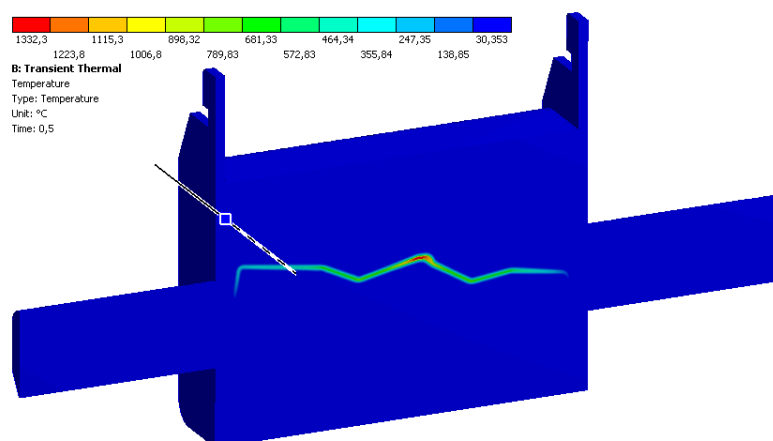
obr. 47 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 180 A



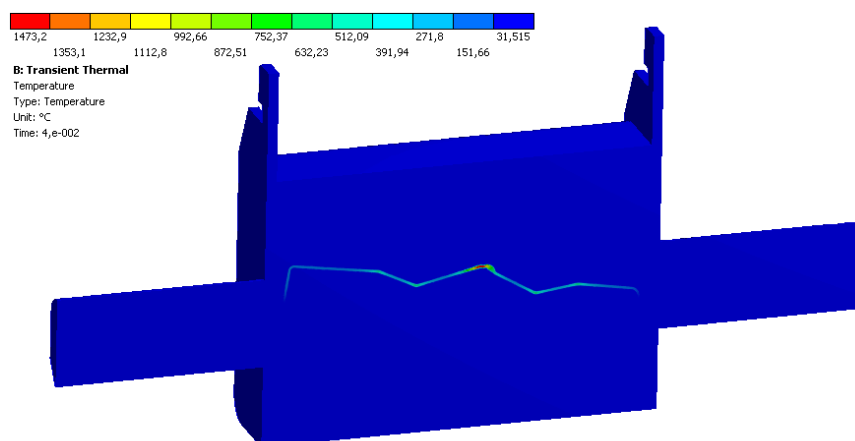
obr. 48 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 200 A



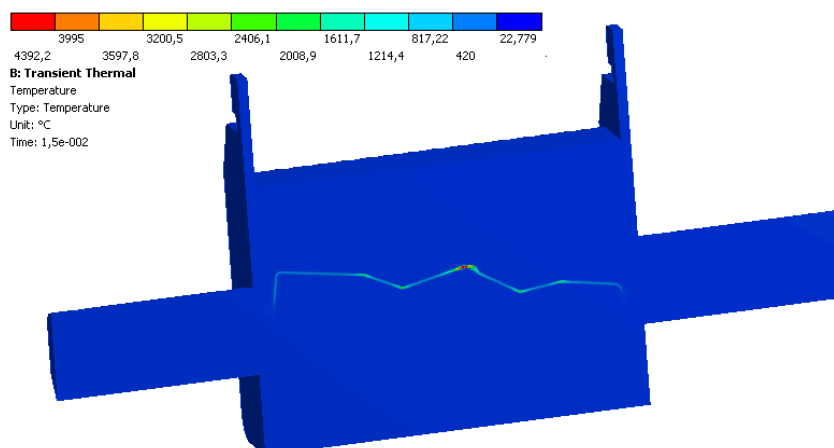
obr. 49 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 300 A



obr. 50 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 520 A



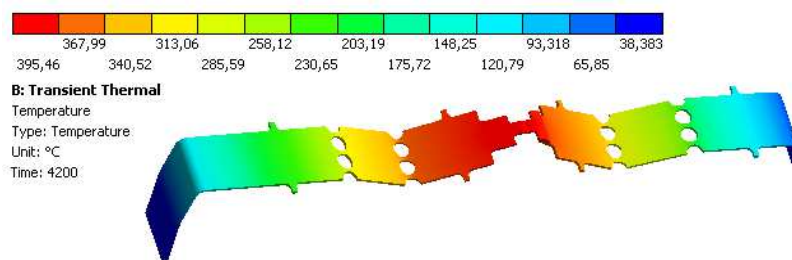
obr. 51 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 1100 A



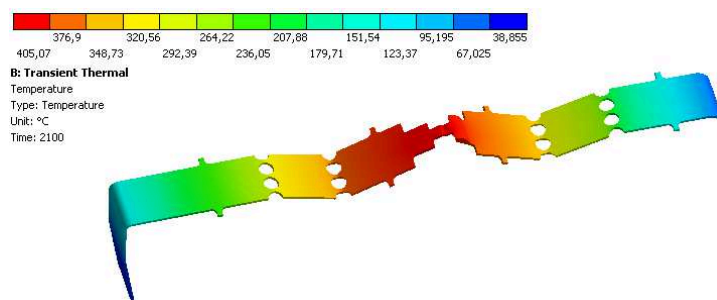
obr. 52 Rozložení teploty v pojistkové vložce při proudu 3400 A

Z obr. 43 až 52 je dobře patrné, jak se s narůstajícím proudem a tím pádem zkracujícím se časem vypnutí pojistkové vložky, přestává uplatňovat odvod tepla z tavného vodiče do okolí. Při malých nadproudech můžeme pozorovat prohřátí téměř celého objemu písku. Teplo vznikající v tavném vodiči je přes písek a za pomoci masivních nožů, vetknutých do velkých ploch čel, účinně odváděno z povrchu pojistkové vložky. Naopak při zkratech se nemá šanci tento děj uplatnit. Vše proběhne tak rychle, že odvod tepla do okolí je zanedbatelný, jak je patrné z obr. 52.

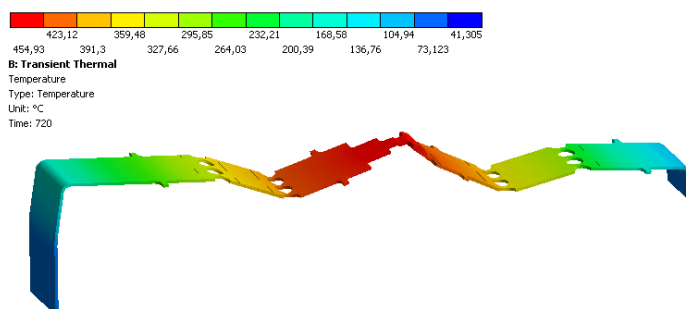
Při pozorování změn v rozložení teploty na tavném vodiči, jak je zobrazeno na obr. 53 až 62, vidíme pro malé nadproudy i zkraty, shodu s teoretickými předpoklady (viz kapitola 1.6 Jevy na tavném vodiči). U malých nadproudů, kdy zároveň předpokládám, že se uplatní vliv cínové pájky, je dosaženo tavné teploty uprostřed tavného vodiče (obr.53). Naopak při zkratu je tavné teploty dosaženo na celém tavném vodiči téměř zároveň (obr. 62).



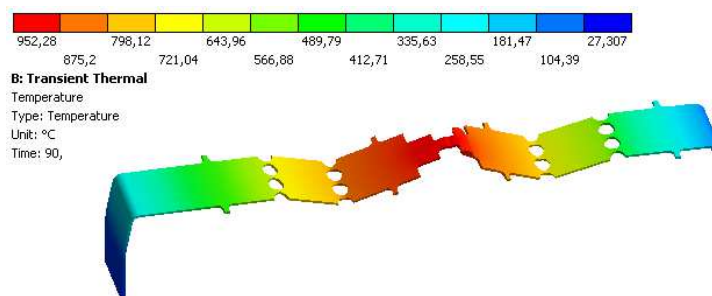
obr. 53 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 90 A



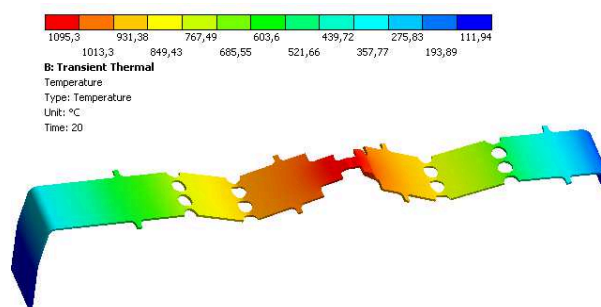
obr. 54 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 95 A



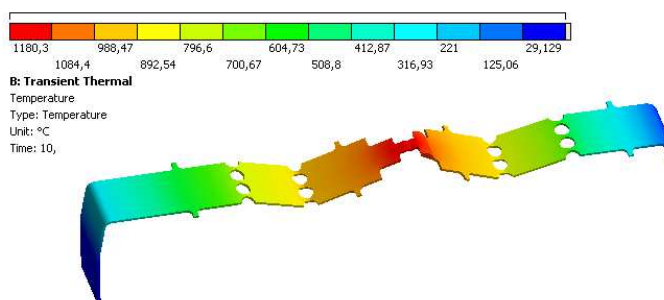
obr. 55 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 105 A



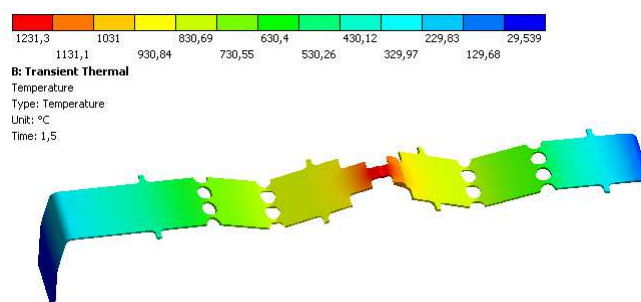
obr. 56 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 135 A



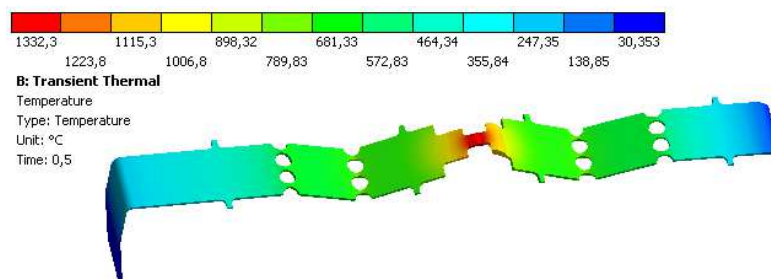
obr. 57 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 180 A



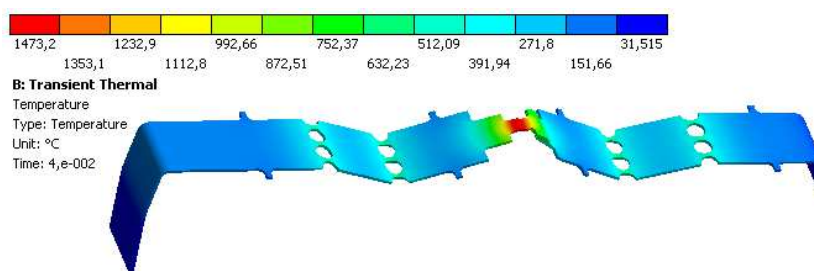
obr. 58 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 200 A



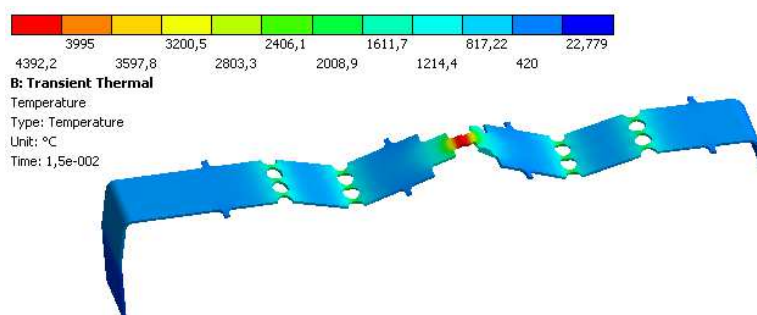
obr. 59 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 300 A



obr. 60 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 520 A



obr. 61 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 1100 A



obr. 62 Rozložení teploty na tavném vodiči při proudu 3400 A

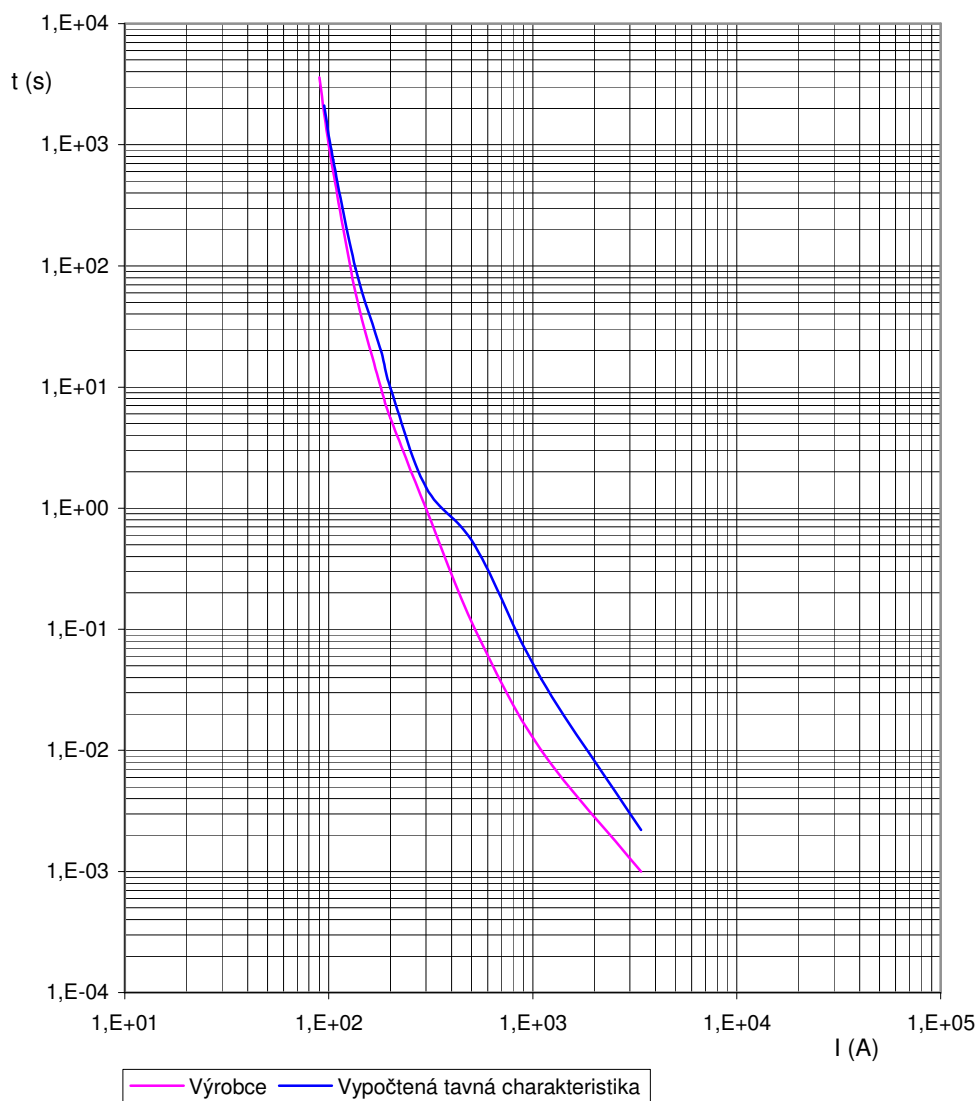
Postupem popsaným výše jsem získal tyto body tavné charakteristiky:

Tab. 5 Body tavné charakteristiky

$I$	Čas
(A)	(s)
3400	2,20E-03
1100	3,90E-02
520	0,49
300	1,49
200	9,8
180	20
135	95
105	750
95	2100
90	4200

Pozn.: Do grafu tavné charakteristiky nebudu poslední řádek tabulky vynášet. Je to z toho důvodu, že došlo k překročení času (3600 s) předepsaného normou ČSN EN 60269-1 ed. 3.

Vypočtená tavná charakteristika pojistky PN1 63 A gG



obr. 63 Vypočtená tavná charakteristika

## 7 Závěr

Pro zpracování této diplomové práce jsem čerpal informace obsažené v literatuře a z připomínek odborných pracovníků. Mojí snahou bylo vysvětlit základní principy fungování pojistek, jakožto jednoho z nejrozšířenějších ochranných prvků proti účinkům zkratů a nadproudů v rozvodech elektrické energie, uvést jejich přednosti a nedostatky, nejčastěji se vyskytující konstrukční provedení a dále pak provést výpočet tavné charakteristiky pro vybraný typ pojistky. Tímto se stala nožová pojistka řady PN1, charakteristiky gG a jmenovitém proudu  $I_N = 63 \text{ A}$  od výrobce OEZ s.r.o. Přínos této práce vidím v odhalení možností současné výpočetní techniky a programového vybavení při výpočtu tavné charakteristiky pojistky. Z průběhu řešení je zřejmé, že ani tak jako technika, či zvolený software, nás nejvíce omezuje znalost a přesnost vstupních dat a definování okrajových podmínek řešení úlohy.

Jak je patrné z grafu na obr. 63, kde je vyneseno srovnání tavné charakteristiky výrobce a tavné charakteristiky vypočtené, popřípadě z tab. 5, vypočtená charakteristika neodpovídá údajům výrobce. V celém rozsahu působení pojistky je dle vypočtené tavné charakteristiky tato modelovaná pojistka pomalejší, což znamená, že v numerickém modelu, sestrojeném v prostředí Ansys Workbench, docházelo k pomalejšímu oteplování tavného vodiče než ve skutečné pojistkové vložce. Důvodů této skutečnosti může být víc.

Při tvorbě numerického modelu je třeba zadat přesné hodnoty materiálových vlastností, materiálů použitých při výrobě pojistkové vložky, a to nejlépe v závislosti na teplotě. Nicméně v mém případě, kdy jsem nebyl v bližším kontaktu s výrobcem, byly tyto hodnoty zadávány v převážné většině dle literatury, výjimkou byl křemičitý písek, který se mi od výrobce podařilo získat a jeho vlastnosti určit vlastním měřením. I zde je však nebezpečí, že pokud bylo toto měření provedeno chybně, vnesla se do výpočtu již na jeho začátku dosti velká chyba. V průběhu řešení numerického modelu jsem si ověřil, že při změně tepelné vodivosti křemičitého písku o jednu desetinu, dojde ke značné změně teploty na tavném vodiči. Pokud by se zadala menší hodnota tepelné vodivosti křemičitého písku, docházelo by rychleji k růstu teploty tavného vodiče na teplotu tavení a charakteristika vypočtená by se přiblížila k té udávané výrobcem.

Dalším důvodem různého průběhu obou charakteristik může být skutečnost, že křemičitý písek byl v numerickém modelu dokonale napojen na samotný tavný vodič. Ve skutečnosti tomu tak ale není. Díky své zrnitosti je písek v kontaktu s povrchem tavného vodiče pouze na omezené ploše, která se nerovná obsahu celé plochy tohoto vodiče. Ve zbylé ploše dochází k podstatně menšímu přestupu tepla z tavného vodiče do křemičitého písku a v důsledku toho dochází k rychlejšímu růstu teploty na tavném vodiči. Tento nedostatek by se dal v modelu odstranit pomocí vytvoření tzv. „kontaktu“ mezi tavným vodičem a křemičitým pískem. Díky tomu lze poté přesně definovat velikost součinitele přestupu tepla na tomto vytvořeném kontaktu a tím zohlednit zmíněný nedokonalý styk mezi křemičitým pískem a tavným vodičem. Bohužel jsem z časových důvodů již nestihl vnést tuto úpravu do mého modelu, nicméně jsem přesvědčen, že toto by byla cesta správným směrem.

Zmíněný přestup tepla do okolí hraje zásadní roli i na vnějších plochách pojistkové tavné vložky, určuje totiž míru jejího chlazení. V numerickém modelu vytvořeném pro tuto



diplomovou práci byla velikost součinitele přestupu tepla do okolí zadávána na jednotlivé plochy jako konstanta, nicméně ve skutečnosti se jeho velikost mění v závislosti na teplotě. Toto zjednodušení má na tvar vypočtené tavné charakteristiky jistě také vliv.

K dosažení úplné shody v charakteristice vypočtené a charakteristice naměřené na pojistce v reálných podmínkách brání ještě skutečnost, že lze obtížně stanovit přesnou teplotu tavení samotného tavného vodiče při nadproudech, kdy je doba působení pojistky v řádu minut. Při takto dlouhých časech se již uplatní vliv cínu (teplota tání 231 °C), či obecně pájky, nanesené ve středu tavného vodiče. Cín začne po dosažení své teploty tání difundovat do tavného vodiče a vzniklá slitina pak bude mít teplotu tavení nižší než-li je teplota tavení samotného materiálu tavného vodiče (měď 1083 °C). Literatura uvádí pro tyto případy teplotu tavení v rozmezí 360 až 400 °C. Pro výpočet tavné charakteristiky je však třeba znát přesnou hodnotu, která by se pak odečítala ve vytvořeném numerickém modelu, neboť zmíněných hodnot teploty je dosahováno v dosti odlišných časech.

Jako možné pokračování v této práci bych viděl dotvoření numerického modelu dle výše nastíněného postupu (vytvoření kontaktu mezi tavným vodičem a křemičitým pískem) a především zjištění přesné hodnoty teploty tavení slitiny vytvořené z nanesené pájky a materiálu tavného vodiče.

## Použitá literatura:

- [1] Novotný V.: *Elektrické přístroje*, ČVUT – Fakulta elektrotechnická, 2001, vydání první, počet stran 203, ISBN 80-01-02306-0
- [2] Helštýn D., Kačor P., Hytka Z.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jistící*, VŠB – TU Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0315-1, počet stran 216
- [3] Havelka O. a kol.: *Elektrické přístroje*, SNTL, Praha 1985, Typové číslo L25-C3-IV-3U/58 603, vydání první, počet stran 440
- [4] Vávra Z.: *Vysoké napětí a elektrické přístroje, Část II Elektrické přístroje*, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, skriptum, počet stran 83
- [5] Pojistkové systémy Varius – katalog OEZ, verze P1-2010-C
- [6] Schneider Electric: *Koordinace jistících přístrojů nn – Selektivita a kaskádování, Technický průvodce – instalace nn, 1. část*, 2004, počet stran 51
- [7] Lenert J.: *Úvod do metody konečných prvků*, VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 1999, vydání první, počet stran 110, ISBN 80-7078-686-8
- [8] Kolář V., Němec I., Kanický V.: *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*, vydání první, Computer Press 1997, ISBN 80-7226-021-9
- [9] Aubrecht V.: *Informatika v silnoproudé elektrotechnice*, VUT Brno – Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, skriptum, počet stran 138
- [10] Kozubková M.: *Modelování proudění tekutin*, FLUENT, CFX, VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Ostrava, 2008, vydání první, počet stran 153
- [11] ČSN EN 60269-1 ed. 3 *Pojistky nízkého napětí – Část 1: Všeobecné požadavky*, březen 2008
- [12] ČSN 35 4701-2 ed. 2 *Pojistky nízkého napětí – Část 2: Doplnující požadavky pro pojistky určené pro kvalifikovanou obsluhu (pojistky převážně pro průmyslové použití) – Příklady normalizovaných pojistkových systémů A až J*, srpen 2011
- [13] Vykoukal V.: *Tepelný model pojistky*, VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Diplomová práce, Ostrava 2001
- [14] Bauer K., List V. a kol.: *Elektrické přístroje – Díl II*, Technický průvodce, Elektrotechnika XV, SNTL, Praha 1965, Typové číslo L25-E1-IV-31/5740/I, vydání první, počet stran 320
- [15] BUL B. K. a kol.: *Elektrické přístroje – Základy teorie*, Přeložil Suchánek V., SNTL, Praha 1977, Typové číslo L25-B3-V-31f/52220, vydání první, počet stran 544

- [16] Havelka O.: *Stavba elektrických přístrojů I*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1984, skriptum, vydání první, počet stran 262
- [17] Vávra Z., Novotný V., Vostracký Z.: *Stavba elektrických přístrojů II*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1985, skriptum, vydání první, počet stran 243
- [18] Havelka O., Vávra Z., Svoboda D.: *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1985, skriptum, počet stran 188
- [19] Havelka O.: *Elektrické přístroje I*, SNTL, Praha 1974, číslo publikace 412-33349, vydání první, počet stran 318
- [20] Cigánek L.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídící*, SNTL, 1956, vydání třetí, počet stran 392, Typové číslo L25-C3-4-II
- [21] Gross B., Havelka O.: *Elektrické přístroje II*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1978, skriptum, počet stran 273
- [22] Hak J., Ošlejšek O.: *Výpočet chlazení elektrických strojů*, 1. Díl – Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet, VUES – Brno 1973, ISBN 80-7078-132-7
- [23] Kvítek E.: *Materiály pro elektrotechniku*, Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera, 2007, skriptum, počet stran 63

## Seznam příloh

Příloha č. 1: Výkresová dokumentace – Pojistka 63 A gG, počet výkresů 6, formát A3

Výkres 1 – Celkový pohled

Výkres 2 – Tavný vodič

Výkres 3 – Tělo pojistky

Výkres 4 – Těsnění

Výkres 5 – Čelo pojistky

Výkres 6 – Nůž pojistky

Příloha na DVD:

Manuál přístroje ISOMET 2104

Model pojistkové vložky vytvořený v SolidWorks

Model pojistkové vložky vytvořený v Ansys Workbench

Diplomová práce ve formátu pdf